



COMPORTAMIENTO MECÁNICO A LA FLEXIÓN Y COMPRESIÓN DEL  
CONCRETO REFORZADO CON FIBRA DE FIQUE EN VIGAS Y CILINDROS.

**PRESENTADO POR:**  
JULIO ANDRES SAAVEDRA JOAQUI  
CARMEN CAROLINA ORTEGA MONTES

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
2020



COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL CONCRETO REFORZADO EN LOSAS Y  
VIGAS CON FIBRAS DE FIQUE.

**Trabajo para optar por el título de ingeniero civil**

**PRESENTADO POR:**

JULIO ANDRES SAAVEDRA JOAQUI  
CARMEN CAROLINA ORTEGA MONTES

**DIRECTOR:**

CAMILO HIGUERA FLÓREZ

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
2020



## Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra  
hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

**NOTA DE ACEPTACIÓN:**

---

---

---

---

---

---

---

**FIRMA DEL PRESIDENTE DEL JURADO**

---

**FIRMA JURADO**

---

**FIRMA JURADO**

**BOGOTA D.C. 17 noviembre de 2020**

## ***DEDICATORIA***

Dedico este trabajo de grado a mi madre Noraydis Montes Echenique, a mi papá y hermano quienes me brindaron su apoyo incondicional y fueron de fortaleza en momentos difíciles, a mi novio quien ha sido mi amigo y gran compañero a lo largo de esta etapa académica, a ellos toda mi gratitud y amor.

Dedico esta tesis a mi papá Julio Vicente Saavedra Peñalosa, y a mi madrina Luz Helena Aguilar Saavedra, quienes son las personas que me han apoyado económica y moralmente a lo largo de esta etapa, la cual no hubiera podido culminar sin su apoyo. A mi novia le agradezco toda la paciencia, amor, y apoyo a lo largo de esta etapa, ella quien fue mi hombro y apoyo en los momentos más difíciles.

## **AGRADECIMIENTOS**

*Quiero agradecer en primer lugar a Dios, por guiarme en todo el proceso de este proyecto y fortalecerme para culminar una etapa académica e iniciar otra etapa de éxitos profesionales.*

*Así mismo, quiero agradecer a mi madre, familia y mi novio por ser las personas que me dieron su ayuda y soporte para poder realizar esta meta y cumplir este sueño, agradecerles por su constante motivación, consejos, dedicación y sobre todo por su amor.*

*Muestro mis más sinceros agradecimientos a mi tutor de proyecto y profesores que con su conocimiento y su guía fueron de gran ayuda e imprescindibles para el desarrollo de este trabajo.*

*Por último, agradecerles a mis amigos y compañeros de estudio con quienes compartí varios años de esfuerzo, alegrías, tristezas, conocimientos; gracias por aportarme confianza en mí y creer juntos en este proyecto.*

*A todos muchas gracias,*

### **Carmen Carolina Ortega Montes.**

*Quiero agradecer primeramente a Dios, por darme las fuerzas, su guía espiritual y mental para poder culminar esta etapa académica en mi vida, y las que me esperan por delante.*

*Igualmente, quiero agradecer a mi papá, madrina, familia y mi novia quienes son las personas que siempre estuvieron para apoyarme y escucharme en los momentos de frustración, sin ellos y su constante apoyo, amor, consejos y paciencia no podría haber terminado esta etapa académica de mi vida.*

*Deseo mostrar mis más sinceros agradecimientos a mi tutor de tesis, y al profesor Oscar Contreras Bejarano quienes fueron las personas que nos dieron su guía y ayuda, las cuales fueron imprescindibles para la culminación de este trabajo. Me queda de ellos todo el conocimiento adquirido, su apoyo, guía y su gran amistad.*

*Por último, agradezco sinceramente a mis amigos y compañeros dentro y fuera de la universidad, quienes estuvieron conmigo todos estos años de lucha, aprendizaje, tristezas y alegrías, de todos ellos me quedan muy buenos momentos y espero poder seguir compartiendo la amistad que forjamos durante estos 5 años.*

### **Julio Andrés Saavedra Joaquín**

## TABLA DE CONTENIDO

	<i><b>Pág.</b></i>
1 PRELIMINARES .....	15
1.1 TÍTULO .....	15
1.2 ALTERNATIVA .....	15
1.3 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN .....	15
1.4 EJE TEMÁTICO .....	15
1.5 INTRODUCCIÓN .....	16
1.6 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	18
1.6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	18
1.6.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	18
1.7 JUSTIFICACIÓN .....	20
1.8 OBJETIVOS .....	22
1.8.1 OBJETIVO GENERAL .....	22
1.8.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	22
1.9 ANTECEDENTES .....	23
1.10 METODOLOGIA .....	26
1.11 FORMULACIÓN DE PROYECTO .....	26
1.11.1 Planteamiento del problema y elaboración de objetivos .....	26
1.11.2 Revisión del estado del arte y construcción del documento .....	27
1.11.3 Determinación de datos e información específica para la modelación .....	27
1.12 DISEÑO DEL MODELO NUMÉRICO DE CONCRETO .....	27
1.12.1 Dosificación y composición de la matriz de fique .....	27
1.12.2 Elaboración del modelo digital. ....	28
1.12.3 Modelado de elementos estructurales. ....	28
1.13 EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	31
1.14 ELABORACIÓN DE INFORME FINAL .....	31
2 MARCO TEÓRICO .....	32
2.1 MARCO LEGAL .....	36

3	ESTADO DEL ARTE .....	37
4	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO TIPO CILINDRO .....	42
4.1	DOSIFICACIÓN DE FIQUE PARA LA MATRIZ DE CONCRETO .....	43
4.2	CÁLCULO PARA EL ELEMENTO CILINDRICO .....	43
4.3	CÁLCULO DE LA FUERZA A APLICAR EN EL MODELO .....	45
5	RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL CILINDRO .....	46
5.1	CILINDRO SIN ADICIÓN DE FIBRA .....	46
5.1.1	Esfuerzo a la compresión máxima principal .....	47
5.1.2	Deformación máxima principal .....	48
5.2	CILINDRO CON ADICIÓN DE 0.1% DE FIBRA .....	50
5.2.1	Esfuerzo a la compresión máxima principal .....	51
5.2.2	Deformación máxima principal .....	52
5.3	CILINDRO CON ADICIÓN DE FIBRA DE 0.2% .....	54
5.3.1	Esfuerzo a la compresión máxima principal .....	55
5.3.2	Deformación máxima principal .....	56
5.4	CILINDRO CON ADICIÓN DE FIBRA DE 0.3% .....	58
5.4.1	Esfuerzo a la compresión máxima principal .....	59
5.4.2	Deformación máxima principal .....	60
6	ANÁLISIS RESULTADOS DE ESFUERZOS EN CILINDROS .....	62
7	ANÁLISIS RESULTADOS DEFORMACIONES EN CILINDROS .....	64
8	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO TIPO VIGA .....	66
8.1	CÁLCULO DE LA FUERZA A APLICAR EN EL MODELO .....	68
8.2	MODELACIÓN DE LA VIGA .....	68
9	RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA VIGA .....	69
9.1	VIGA SIN ADICIÓN DE FIBRA .....	69
9.1.1	Esfuerzo a la flexión máxima principal .....	70
9.1.2	Deformación máxima principal .....	71
9.2	VIGA CON ADICIÓN DE FIBRA DE FIQUE DE 0.1% .....	73
9.2.1	Esfuerzo a la flexión máxima principal .....	74
9.2.2	Deformación máxima principal .....	74
9.3	VIGA CON ADICIÓN DE FIBRA DE FIQUE DE 0.2% .....	76



9.3.1	Esfuerzo a la flexión máxima principal .....	77
9.3.2	Deformación máxima principal .....	77
9.4	VIGA CON ADICIÓN DE FIBRA DE FIQUE DE 0.3%.....	79
9.4.1	Esfuerzo a la flexión máxima principal .....	80
9.4.2	Deformación máxima principal .....	80
10	CONCLUSIONES .....	86
10.1	CILINDRO .....	86
10.2	VIGA.....	87
11	RECOMENDACIONES .....	88
12	BIBLIOGRAFÍA .....	89

## TABLA DE TABLAS

<b>Tabla 1. Propiedades de los materiales .....</b>	<b>28</b>
<b>Tabla 2. Clasificación general del agregado según su tamaño .....</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 3. Clasificación del agregado según su densidad .....</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 4. Datos del concreto .....</b>	<b>42</b>
<b>Tabla 5. Datos de la fibra fique .....</b>	<b>42</b>
<b>Tabla 6. Dosificación fibra de fique .....</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 7. Dimensiones del cilindro .....</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 8. Cantidad de fibra de fique - Cilindro .....</b>	<b>44</b>
<b>Tabla 9. Área transversal fibras de fique a utilizar .....</b>	<b>44</b>
<b>Tabla 10. Número de fibras para el cilindro .....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 11. Fuerza a aplicar al cilindro .....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 12. Resultados exportados de abaqus- Cilindro de control .....</b>	<b>46</b>
<b>Tabla 13. Elemento con mayor esfuerzo en el cilindro sin adición de fibra ...</b>	<b>47</b>
<b>Tabla 14. Elemento con mayor deformación en el cilindro sin adición de fibra .....</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 15. Número de fibras con el 0.1% de fique .....</b>	<b>50</b>
<b>Tabla 16. Resultados exportados de abaqus- Cilindro con 0.1% de fique .....</b>	<b>50</b>
<b>Tabla 17. Elemento con mayor esfuerzo en el cilindro con adición de 0.1% de fibra. ....</b>	<b>51</b>
<b>Tabla 18. Elemento con mayor deformación en el cilindro con adición de 0.1% fibra .....</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 19. Gráficas elemento con mayor deformación cilindro con adición de 0.1% fibra .....</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 20. Número de fibras con el 0.2% de fique .....</b>	<b>54</b>
<b>Tabla 21. Resultados exportados de abaqus- Cilindro con 0.2% de fique .....</b>	<b>54</b>
<b>Tabla 22. Elemento con mayor esfuerzo en el cilindro con adición de 0.2% de fibra .....</b>	<b>55</b>
<b>Tabla 23. Elemento con mayor deformación en el cilindro con adición de 0.2% fibra .....</b>	<b>57</b>
<b>Tabla 24. Número de fibras con el 0.3% de fique .....</b>	<b>58</b>
<b>Tabla 25. Resultados exportados de abaqus- Cilindro con 0.3% de fique .....</b>	<b>58</b>
<b>Tabla 26. Elemento con mayor esfuerzo en el cilindro con adición de 0.3% de fibra .....</b>	<b>59</b>
<b>Tabla 27. Elemento con mayor deformación en el cilindro con adición de 0.3% fibra .....</b>	<b>61</b>
<b>Tabla 28. Resumen esfuerzos y deformaciones en los cilindros elemento 284 .....</b>	<b>62</b>

<b>Tabla 29. Resumen esfuerzos y deformaciones en los cilindros elemento 101</b>	<b>64</b>
<b>Tabla 30. Dimensiones de la viga</b>	<b>66</b>
<b>Tabla 31. Área transversal fibras de fique a utilizar</b>	<b>67</b>
<b>Tabla 32. Número de fibras para la viga</b>	<b>67</b>
<b>Tabla 33. Fuerza a aplicar en la viga</b>	<b>68</b>
<b>Tabla 34. Resultados exportados de abaqus-Viga de control</b>	<b>69</b>
<b>Tabla 35. Elemento con mayor esfuerzo en la viga sin adición de fibra</b>	<b>70</b>
<b>Tabla 36. Elementos con mayor esfuerzo y deformación en la viga sin adición de fibra</b>	<b>72</b>
<b>Tabla 37. Número de fibras con el 0.1% de fique</b>	<b>73</b>
<b>Tabla 38. Resultados exportados de abaqus-Viga con 0.1% de fique</b>	<b>73</b>
<b>Tabla 39. Elementos con mayor esfuerzo y deformación en la viga con adición de 0.1% fibra</b>	<b>75</b>
<b>Tabla 40. Resultados exportados de abaqus-Viga con 0.2% de fique</b>	<b>76</b>
<b>Tabla 41. Elementos con mayor esfuerzo y deformación en la viga con adición de 0.2% fibra</b>	<b>78</b>
<b>Tabla 42. Número de fibras con el 0.3% de fique</b>	<b>79</b>
<b>Tabla 43. Resultados exportados de abaqus-Viga con 0.3% de fique</b>	<b>79</b>
<b>Tabla 44. Elementos con mayor esfuerzo y deformación en la viga con adición de 0.3% fibra</b>	<b>81</b>
<b>Tabla 45. Resumen esfuerzos y deformaciones en las vigas elemento 627</b>	<b>82</b>
<b>Tabla 46. Resumen esfuerzos y deformaciones en las vigas elemento 628</b>	<b>84</b>

## TABLA DE FIGURAS

<b>Figura 1. Metodología del trabajo.....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 2. Elementos modelados .....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 3. Ensamble fibras de fique y concreto.....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 4. Modelos cargados y empotrados. ....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 5. Mallado de los elementos.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 6. Interacción fibras y elemento de concreto. ....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 7. Esquema de la ubicación del agua en la pasta de cemento hidratado .....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 8. Modelo cilindro sin adición de fibra-esfuerzo máximo.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 9. Gráficas elemento con mayor esfuerzo cilindro sin adición de fibra .....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 10. Modelo cilindro sin adición de fibra-deformación máxima .....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 11. Gráficas elemento con mayor deformación cilindro sin adición de fibra .....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 12. Modelo cilindro con 0.1% adición de fibra-esfuerzo máximo a la compresión.....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 13. Gráficas elemento con mayor esfuerzo cilindro con adición de 0.1% fibra .....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 14. Modelo cilindro con adición de 0.1% fibra-deformación máxima..</b>	<b>52</b>
<b>Figura 15. Modelo cilindro con 0.2% adición de fibra-esfuerzo máximo a la compresión.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 16. Gráficas elemento con mayor esfuerzo cilindro con adición de 0.2% fibra .....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 17. Modelo cilindro con adición de 0.2% fibra-deformación máxima... </b>	<b>56</b>
<b>Figura 18. Gráficas elemento con mayor deformación cilindro con adición de 0.2% fibra .....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 19. Modelo cilindro con 0.3% adición de fibra-esfuerzo máximo a la compresión.....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 20. Modelo cilindro con adición de 0.3% fibra-deformación máxima... </b>	<b>60</b>
<b>Figura 21. Gráficas elemento con mayor deformación cilindro con adición de 0.3% fibra .....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 22. Comparativo esfuerzos Vs % de fibra - Cilindro .....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 23. Comparativo Deformaciones Vs % de fibra - Cilindro .....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 24. Modelo obtenido para la viga en ABAQUS .....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 25. Modelo viga sin adición de fibra-esfuerzo máximo .....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 26. Gráficas elemento con mayor esfuerzo viga sin adición de fibra .</b>	<b>71</b>
<b>Figura 27. Modelo viga sin adición de fibra-deformación máxima.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 28. Gráficas elemento 627 viga sin adición de fibra .....</b>	<b>72</b>

Figura 29.Gráficas elemento 628 viga sin adición de fibra .....	72
Figura 30. Modelo viga con 0.1% adición de fibra-esfuerzo máximo a la flexión .....	74
Figura 31. Modelo viga con adición de 0.1% fibra-deformación máxima.....	74
<i>Figura 32.Gráficas elemento 627 viga con adición de 0.1% fibra</i> .....	75
Figura 33.Gráficas elemento 628 viga con adición de 0.1% fibra .....	75
Figura 34.Número de fibras con el 0.2% de fique .....	76
Figura 35. Modelo viga con 0.2% adición de fibra-esfuerzo máximo a la flexión .....	77
Figura 36. Modelo viga con adición de 0.2% fibra-deformación máxima a la flexión .....	77
Figura 37.Gráficas elemento 627 viga con adición de 0.2% fibra .....	78
Figura 38.Gráficas elemento 628 viga con adición de 0.2% fibra .....	78
Figura 39. Modelo viga con 0.3% adición de fibra-esfuerzo máximo a la flexión .....	80
Figura 40.Modelo viga con adición de 0.3% fibra-deformación máxima a la flexión .....	80
Figura 41.Gráficas elemento 627 viga con adición de 0.3% fibra .....	81
Figura 42.Gráficas elemento 628 viga con adición de 0.3% fibra .....	81
Figura 43. Comparativos esfuerzos Vs % de fibra - Viga .....	83
Figura 44.Comparativo deformación Vs % de fibra - Viga .....	85

## GLOSARIO

- 1.1. **Concreto:** el concreto u hormigón es un material empleado en construcción, formado principalmente por un aglomerante, áridos (arena y piedras), agua y otros aditivos específicos según las características del mismo.
- 1.2. **Concreto reforzado:** también llamado hormigón armado, se compone de concreto con una armadura metálica de interna, es decir, a la matriz de concreto convencional se le incorporan barras o mallas de acero.
- 1.3. **Fibras naturales:** son fragmentos, hebras o pelo, de origen natural, y que pueden hilarse para dar lugar a cuerdas. Las fibras que no provienen de la Naturaleza se denominan fibras artificiales o sintéticas.
- 1.4. **Fique:** planta de hojas largadas, triangulares, carnosas, terminadas en un fuerte aguijón, se emplea en la fabricación de fibras, textiles, entre otros usos.
- 1.5. **Esfuerzo de compresión:** es la resultante de las tensiones o presiones que existen dentro de un sólido deformable, se caracteriza porque tiende a una reducción del volumen del sólido.
- 1.6. **Resistencia a la flexión:** es el esfuerzo máximo de una fibra, superficie de un sólido, probeta, u otro cuerpo deformable, este es desarrollado justo antes de que se agriete o se rompa.
- 1.7. **Deformación:** es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos externos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo.
- 1.8. **Coeficiente de Poisson:** le dieron este nombre en honor al físico francés Simeón Poisson. Es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma, cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento.

# **1 PRELIMINARES**

## **1.1 TÍTULO**

COMPORTAMIENTO MECÁNICO A LA FLEXIÓN Y COMPRESIÓN DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRA DE FIQUE EN VIGAS Y CILINDROS.

## **1.2 ALTERNATIVA**

Según lo establecido en el Acuerdo 213 Art. 2, el presente anteproyecto obedece a la alternativa 3.3. Correspondiente a trabajo de investigación.

## **1.3 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN**

- Materiales

## **1.4 EJE TEMÁTICO**

- Comportamiento mecánico del concreto.

## 1.5 INTRODUCCIÓN

El concreto tradicionalmente siempre ha sido el material más utilizados en la industria de la construcción[1], esto debido a las grandes propiedades que presenta en cuanto a durabilidad y resistencia a la compresión, pero presenta bajas capacidades de resistencia a la tracción y flexión. Para solventar las falencias del concreto frente a la tracción y flexión, se ha utilizado tradicionalmente el acero en conjunto con el concreto, esto ha permitido la construcción de grandes estructuras, gracias a la fusión de estos 2 materiales.

Gracias a los avances científicos en las ciencias de materiales, se ha optado por el estudio e implementación de nuevos materiales en la industria de la construcción, como lo han sido las fibras sintéticas, fibras metálicas, y las fibras naturales, estas fibras tiene como principales características disminuir el peso de las estructuras, proporcionar grados aceptables de resistencia, y disminución de los costos.[2]. Esto ha generado numerosas investigaciones de diferentes fibras naturales, que han demostrado las propiedades mecánicas que le aportan al concreto, y los beneficios que trae consigo el uso de recursos naturales y renovables.

Las fibras metálicas han sido utilizadas como adición al concreto gracias a las propiedades mecánicas que le mejoran al concreto simple, permitiendo un comportamiento adecuado antes y después del agrietamiento [3]. Dentro de las ventajas que presenta el uso de fibras metálicas en el concreto se encuentran:

- Mejora en el comportamiento de contracción y flujo plástico.
- Proveen tenacidad a flexión.
- Incrementan las propiedades de resistencia a impacto y fatiga.

A pesar de tener múltiples ventajas el uso de estas fibras metálicas en el concreto, presenta desventajas como lo son alta susceptibilidad a la corrosión, formación de erizos en las mezclas, al igual que aumentar el peso de la matriz de concreto una vez adicionadas en la mezcla, lo que provoca estructuras más pesadas.

Las fibras sintéticas al igual que las metálicas han sido usadas como adicción al concreto siendo agregadas como macro fibras, dentro de sus ventajas encontramos que no sufren procesos de corrosión, garantizan la durabilidad, son químicamente estables [4], entre otros. Estas fibras sintéticas como los son las de polipropileno que son las más usadas actualmente en el mercado, presentan varias ventajas frente a las demás fibras, pero igual poseen desventajas como lo son:

- Bajo módulo de elasticidad.



- Susceptibles a la degradación por luz, calor y oxígeno, lo que genera mayores costos en su producción, al tener que realizar procesos antioxidantes y estabilizantes.
- Presentan problemas de adherencia, entre las fibras y la matriz cementosa.

Entre las muchas fibras naturales disponibles, se tiene el fique un material obtenido de la hoja de fucracea andina. Esta planta posee hojas que pueden alcanzar alturas entre los 2 y 7 metros, con un vástago de estructura cilíndrica que generalmente tiene entre 75 y 100 hojas, esta planta es un cultivo de largo plazo el cual puede vivir hasta los 20 años, la cual puede ser cosechada de 3 a 6 años luego de su plantación. Entre los muchos usos que tradicionalmente se le ha dado a esta planta el 80% de su producción ha sido destinada al mercado de cuerdas y bolsas, mientras que el 20% restante se destina para usos artesanales.[5] Colombia históricamente ha sido el principal productor de fique en el mundo [6], pero como una economía históricamente ligada solo al sector primario, no se han explotado las cualidades de esta fibra.

Generalmente las fibras naturales están compuestas por ligamentos fibrosos, que a su vez se componen de microfibrillas dispuestas en capas de diferentes espesores y ángulos de orientación. Estas fibras se encuentran aglomeradas por mela intercelular, compuesta por hemicelulosa, peptina y principalmente lignina. [2].

El trabajo de investigación desarrollado en este documento tiene como idea principal analizar las propiedades mecánicas del concreto, en una losa, cilindro y viga fabricada con concreto y fibra de fique. Para el caso de la losa, se determinara a través de diferentes opciones de entramado de las fibras de fique para la malla de refuerzo, cual es la disposición que aporta la mayor mejora a las propiedades mecánicas del concreto, cumpliendo con los lineamientos estipulados por el REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE [7].

## **1.6 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

Uno de los retos en la construcción es la constante búsqueda de nuevos materiales, que aporten propiedades de adherencia, resistencia y mejores comportamientos a diferentes temperaturas. Tradicionalmente el concreto es el principal material de construcción gracias a sus propiedades de resistencia y durabilidad, que presenta frente a otros materiales; Pero a su vez posee desventajas cuando este material es sometido a cambios de temperaturas y esfuerzos de tracción. Esto conlleva al nacimiento del concreto reforzado, material en el cual el acero que se le adiciona a la matriz de concreto, es el encargado de resistir los esfuerzos a tracción y controlar los cambios producidos por la temperatura. Tradicionalmente la combinación de acero-concreto es la más efectiva, adicional a esto le aporta un gran peso a la estructura lo que ha generado, una fuerte investigación frente a posibles combinaciones con diferentes materiales al acero, que mejore las capacidades mecánicas del concreto sin aumentar significativamente el peso del mismo. Partiendo de esta oportunidad que se presenta en torno a los materiales de construcción, se propone el estudio de los efectos de la adición de fibras naturales en las capacidades mecánicas del concreto y el peso de la matriz de concreto.

### **1.6.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Después de realizar una búsqueda de fibras naturales que han sido utilizadas en diversos proyectos de investigación, se determinó por usar la fibra natural fique ya que Colombia[8] es el principal productor de esta fibra, pero no se ha explotado del todo sus potenciales usos en la industria de la construcción, sino que se ha visto limitado a la industria artesanal.

Dentro de las investigaciones que se han realizado entorno al uso de fibras naturales como agregado al concreto[2] y [9], encontramos que cada fibra natural presenta diferentes aportes a las propiedades mecánicas del concreto. Se ha evidenciado que la fibra de fique, es una fibra vegetal de muy bajo costo la cual se

encuentra con gran facilidad y abundancia en el país, adicional a esto presenta propiedades a nivel físico y químico que le aportan importantes aumentos a las capacidades mecánicas del concreto, cuando esta fibra es agregada como fibra suelta. Estas investigaciones con resultados favorables en el uso de las fibras naturales como agregado suelto adicionado al concreto, genera nuevas formas de utilización de dichas fibras para aumentar las propiedades mecánicas del concreto, por lo cual se plantea la siguiente interrogante ¿Qué efectos tienen la adición de las fibras de fique sobre las propiedades mecánicas (flexión, compresión) del concreto? Para resolver este interrogante planteado, se propone la utilización de software de simulación que aplique el método de elementos finitos, a través del cual se pueda modelar los elementos, que permitan visualizar los efectos de las fibras de fique en la matriz de concreto.

## 1.7 JUSTIFICACIÓN

El concreto ha sido uno de los materiales más utilizado en la construcción [1], debido a sus propiedades de agruparse con otros elementos para poder ofrecer un buen comportamiento mecánico, es por este motivo que la presente investigación se enfoca en el análisis del comportamiento del concreto reforzado con fibra natural, la cual le aporta al concreto mejores capacidades de resistencia a la flexión, tracción y compresión.

Debido a la debilidad del concreto ante esfuerzos de tensionamiento que acceden al límite elástico, baja capacidad de deformación o arqueamiento y que por tal razón este desarrolla fisuras, ha sido necesario adicionarle diferentes materiales que desarrollen estas capacidades elásticas y que a su vez este material tenga una buena relación y adherencia con el concreto. Una opción adoptable que ayude al concreto a mejorar o superar sus debilidades y que además apunte a una solución sostenible, es la aplicación de las fibras naturales como el fique; el cual contribuye a disminuir la fragilidad del material.

El fique es una planta nativa de la América tropical en especial de Colombia y Venezuela por lo tanto es de fácil acceso y distribución en nuestro medio, solo en Colombia se producen anualmente más de 17,000 ha. Distribuidas en los diferentes departamentos[10]; esta planta comprende más de 20 especies diferentes de donde se extraen sus hojas que contienen el 4% de la fibra textil del fique; además es considerada vivípara y se puede encontrar con más de 50 años de edad aunque su periodo de vida va desde los 10 a 20 años, y su vida útil de producción de fibras y jugos comienza desde los 3 y 6 años, lo que establece como el periodo de cosecha [2].

Además de lo anteriormente dicho el fique, aunque siendo una fibra natural tiene excelentes comportamientos mecánicos, según estudios realizados por GAÑAN, P. and MONDRAGON, la fibra de fique obtuvo una resistencia a la tracción de 237 MPa, un módulo de elasticidad de 8,010 GPa y una deformación de 6,020% hasta la ruptura. Datos que están dentro del rango de los intervalos establecidos por Delvasto et al [10].

La importancia de realizar este tipo de investigación está dada por la innovación y utilización de nuevos materiales que son de fácil acceso ya que se encuentran en

la flora del país, presentan un buen comportamiento en las capacidades mecánicas de los elementos estructurales y un menor costo en comparación con otros materiales.

## **1.8 OBJETIVOS**

### **1.8.1 OBJETIVO GENERAL**

- Analizar el comportamiento mecánico (compresión, flexión) del concreto reforzado con fibra natural de Fique, a través de un software de análisis por elementos finitos 'Abaqus' para establecer el comportamiento mecánico de los elementos (viga y cilindro).

### **1.8.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar una revisión del estado del arte, para determinar la información específica a ser utilizada como datos iniciales en la modelación de los elementos estructurales reforzados con fibra de fique.
- Realizar una modelación digital de elementos (viga y cilindro) en concreto reforzados con fibra de fique, a través de un programa que permita evaluar el comportamiento mecánico del concreto con diferentes porcentajes y distribuciones de fibra fique.
- Analizar el efecto de la adición de fibra fique en el concreto, mediante la comparación entre los resultados obtenidos en la modelación y un concreto sin adición de fibra natural fique.

## 1.9 ANTECEDENTES

El concreto como se mencionó anteriormente es el material más utilizado en construcción, gracias a las diferentes ventajas de resistencia, durabilidad, entre otras que le ofrece al sector de la construcción. Es por esto que desde épocas antiguas el hombre adicionaba a los morteros de construcción crin de caballo y paja a los ladrillos de barro como refuerzo [11]. Desde inicios del siglo XX, se ha venido investigando como mejorar las propiedades del concreto, a través de la adición de diferentes tipos de fibras al concreto que le han permitido al ser humano una serie de nuevos concretos con diferentes propiedades.

En la actualidad ha tomado más fuerza la investigación de nuevos materiales en la construcción, que generen un menor impacto ambiental negativo, renovables y a bajo costo, como lo son las fibras naturales. A continuación, se indican una serie de investigaciones realizadas, entorno a la adición de fibras naturales al concreto:

[12], se estudiaron las propiedades mecánicas de compresión y flexión del concreto con adición de fibras de fique y humo de sílice como recubrimiento de las fibras de fique, en este estudio variaron los contenidos de humo de sílice en 5%, 7.5%, y 10% del peso del cemento, realizaron el respectivo diseño de mezcla y elaboraron muestras de concreto de 3000 PSI para evaluar su comportamiento a los 7, 14, y 28 días. Se fabricaron para evaluar cada propiedad propuesta en el trabajo, 5 cilindros, de los cuales 3 poseían un contenido de fique y humo de sílice, el cuarto cilindro solo contenía una adición de fique, y el quinto cilindro era concreto simple. En los resultados a compresión de las cinco muestras se evidencio que la muestra que contenía concreto y fique presento una mejora en la resistencia (1.29%) con respecto a la muestra de concreto sin adición de fique, a flexión se evidencio que el fique presento una disminución mínima (0.48%) en la resistencia de la muestra de concreto con respecto al concreto sin adición de fique. De la adición de sílice se concluyó que este le aportaba disminución en la degradación a las fibras de fique, pero afectaba considerablemente el comportamiento del concreto en compresión y tensión disminuyendo sus resistencias en comparación con la muestra que no tenía adición de fibra ni de sílice. Una gran ventaja que le adiciono al concreto el fique, fue que la muestra después de alcanzar el módulo de rotura, no presento desprendimiento del material.

[13], evaluaron las propiedades mecánicas del concreto con adición de fibra de estopa de coco, esto se realizó mediante la fabricación de vigas y cilindros, a la estopa de coco se le realizo un tratamiento con una solución de cal, durante 48 horas para disminuir la degradación debido a la alta alcalinidad del concreto. Durante los ensayos de compresión se evidencio que las fibras de coco las cuales tenían una longitud de 2 y 5 cm, en cada muestra le aportaron mejoras en la

resistencia a la compresión del concreto, sin aumentar significativamente el peso de la muestra, adicional a esto las muestras que contenían fibras con longitudes de 5 cm, disminuyeron considerablemente la deformación del concreto ya que la fibra impide el progreso de la grieta, y mantiene unido el material después de la falla. A flexión se evidenció que las fibras le aportaron de manera significativa resistencia al concreto cuando estas fueron agregadas en un 0.5% del volumen de mezcla y con una longitud de 5 cm.

[14], este estudio se centró básicamente en determinar el comportamiento del concreto reforzado con fibra de lechuguilla, y encontrar el revestimiento que generara el menor desgaste de la fibra natural debido a la alcalinidad del concreto. Se trataron experimentalmente 6 sustancias hidrófobas y económicas, para poder determinar por medio de una solución se realizaron adiciones de fibras con longitudes de 2 y 3 cm, de las longitudes de las fibras se determinó que las fibras con mayor longitud presentaron una mayor adherencia ya que estas tuvieron una falla por ruptura, mientras que las fibras de longitud más corta presentaron falla por extracción. El revestimiento que tuvo un mejor comportamiento frente a la alcalinidad fue la parafina, ya que redujo la capacidad de absorción de agua. Se pudo concluir de la investigación que las fibras de lechuguilla largas adicionadas en baja cantidad, le proporcionan al concreto la capacidad de soportar mayores cargas de flexión, y le permitieron un comportamiento dúctil después del agrietamiento de la matriz de concreto.

[8], se evaluó experimentalmente el comportamiento a flexión de láminas de mortero reforzado con mallas de fique, esto se hizo mediante la fabricación de losas de concreto con diferentes espaciamientos entre fibras, se pudo analizar que el desarrollo de la capacidad de enclavamiento entre el mortero y la malla de fique, se vio afectada por el espaciamiento entre fibras, ya que a menor espaciamiento menor enclavamiento se generaba entre el mortero y la malla, lo que no permitió un mayor aumento de la ductilidad, en comparación con las mallas que tenían un espaciamiento adecuado. En conclusión, se determinó que las mallas de fique aportaron a las losas de mortero una gran capacidad de acumular energía después de la fisuración, aumentando la ductilidad del material y generando un comportamiento adecuado a flexión. Adicional a esto se evidenció que las losas reforzadas con fique, presentaron un comportamiento comparable con losas reforzadas con polipropileno comercial, lo que convierte al fique en una fibra prometedora de bajo costo, para usos en la construcción.

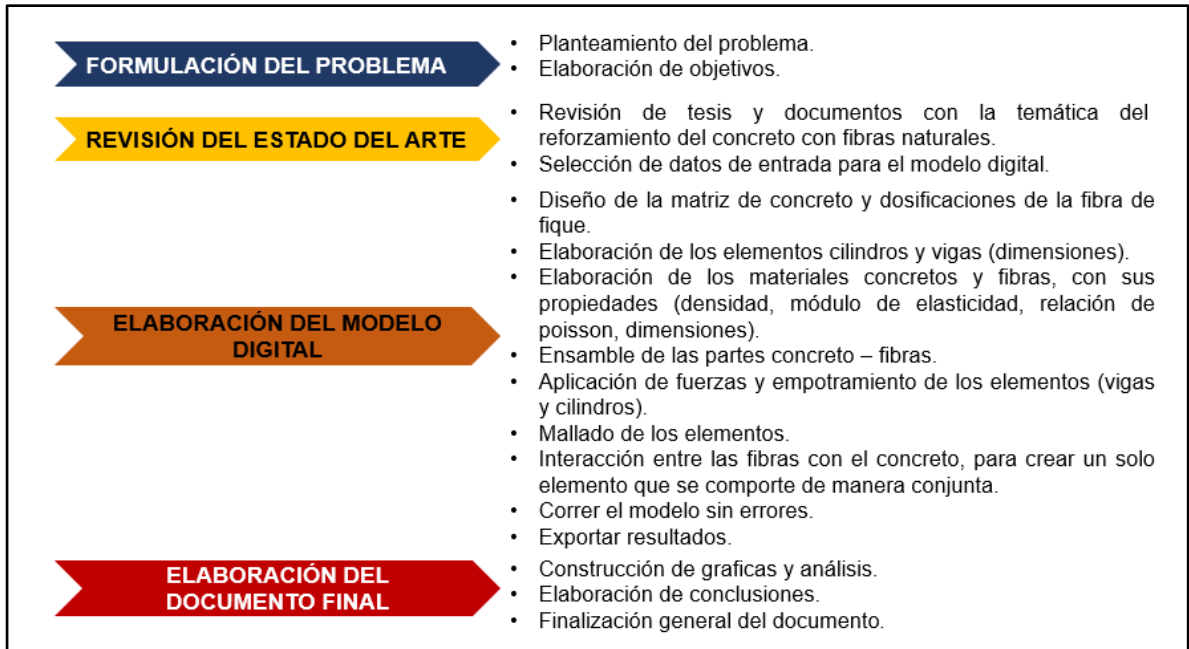
[15], se estudió el comportamiento de mezclas de concreto con diferentes resistencias, y con 4 porcentajes de adición de fibra de fique, la fibra fue adicionada como material suelto, las fibras de fique fueron adicionadas directamente a la mezcla de concreto sin realizarse un tratamiento previo, que las protegiera contra la alcalinidad del concreto. En los cilindros ensayos a compresión se evidenció que el



concreto adicionado con fibras de fique, presentaba una disminución importante en la resistencia a la compresión con respecto al concreto convencional sin fibra, pero cuando el porcentaje de fibra agregada fue del 3%, se mostró una mejora considerable alcanzando a los 28 días una resistencia superior en un 6% al del diseño de la mezcla, cabe resaltar que el fique le proporciono en todos los casos al concreto, la ventaja de que cuando se alcanzaba el punto de rotura, el cilindro no estalla de forma abrupta gracias a la adherencia de la matriz cementicia, con el fique. En los ensayos a flexión se presentó el mismo comportamiento que a compresión. Se pudo concluir que con porcentajes de fibra superiores al 0.5% del volumen de concreto, se presentaron disminuciones considerables en la resistencia a compresión, y una disminución en la densidad del concreto haciéndolo más susceptible a fallar. Al igual que en estudios previos con fibras naturales, se recomienda trabajar con longitudes de fibra entre 2 y 5 cm, ya que una longitud menor no permitiría una adherencia con el concreto generando fallas por extracción, y longitudes mayores se corre el riesgo de que las fibras se adhieran entre sí.

## 1.10 METODOLOGIA

Figura 1. Metodología del trabajo.



Fuente. Propia.

## 1.11 FORMULACIÓN DE PROYECTO

### 1.11.1 Planteamiento del problema y elaboración de objetivos

Durante el planteamiento del problema y la elaboración de los objetivos, se inició por la búsqueda del estado del arte en materiales de construcción donde se halla empleado la fibra natural de fique. Luego se procedió a definir el método de evaluación y análisis del concreto con el fin de construir objetivos alcanzables durante la realización y ejecución del trabajo de investigación, en el cual se definieron sus alcances y limitaciones, los cuales sirvan como guía para futuras investigaciones de este material. Terminado el proceso de recolección de información y planteamiento de objetivos se optó por formular y justificar el problema que se pretende atacar, con el desarrollo de la investigación.

### **1.11.2 Revisión del estado del arte y construcción del documento**

En el desarrollo del trabajo de investigación se revisó información proveniente de tesis, libros, artículos científicos, trabajos de grados, entre otros, los cuales fueron encontrados en su mayoría en las bases de datos de la Universidad Católica De Colombia, correspondiente al uso de fibras naturales en el concreto especialmente el uso de fibra de fique, y su influencia sobre las propiedades mecánicas de concreto de compresión y flexión. Con esta revisión del estado de arte se pudo verificar los estudios y resultados obtenidos de las fibras naturales como agregado del concreto, así como se pudo conocer las limitación y recomendaciones dictaminadas por cada uno de los autores de dichos trabajos, esto permitió, seleccionar el enfoque de este trabajo de grado, los posibles resultados a obtener y los alcances que tendría este trabajo de investigación; con la elaboración de este trabajo se quiere impulsar futuras investigaciones del material fique como agregado del concreto, tomando como referencia el trabajo realizado.

### **1.11.3 Determinación de datos e información específica para la modelación**

Luego de realizar el estado del arte se tomarán datos e información de documentos ya evaluados que permitan realizar o caracterizar el modelo digital.

## **1.12 DISEÑO DEL MODELO NUMÉRICO DE CONCRETO**

### **1.12.1 Dosificación y composición de la matriz de fique**

Se proponen dosificaciones del 0.1%, 0.2% y 0.3% de fibra de fique para la elaboración del modelo digital del concreto; con diferentes matrices de distribución de la fibra de acuerdo a la disposición del elemento estructural.

Para los elementos estructurales tipo cilindro, se dispuso la alineación de la fibra natural de forma perpendicular al cilindro en el sentido longitudinal, creando cruces internos entre las fibras lo que permitió simular de esta manera la ortogonalidad que presentan el refuerzo en acero, tradicionalmente usado en construcción.

Para los elementos estructurales tipo vigas se dispuso la alineación de la fibra natural de forma paralela a la longitud de la misma y en pequeñas agrupaciones ubicadas en la parte superior e inferior de la de sección transversal; simulando de esta manera la colocación del acero en un concreto reforzado convencional.

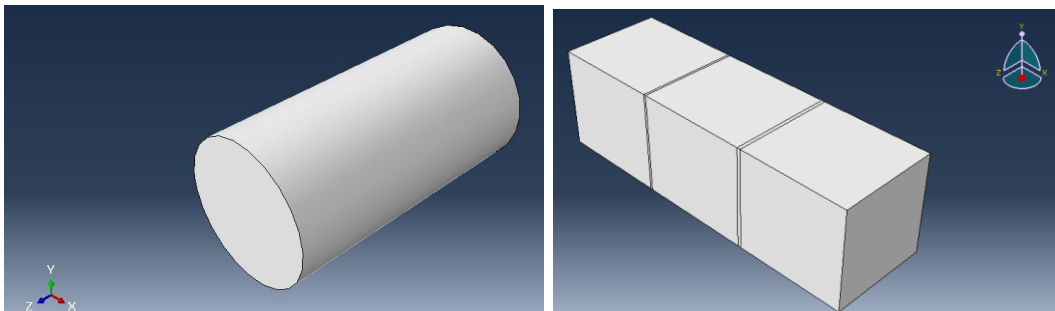
### 1.12.2 Elaboración del modelo digital.

Se utilizó el programa Abaqus [16] de modelación de elementos finitos, para la obtención de las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibra natural de fique.

### 1.12.3 Modelado de elementos estructurales.

- Se inició por la creación de las partes que conforman cada uno de los elementos modelados (vigas, cilindros, fibras). Para esto se definieron las dimensiones de cada uno de los elementos y la cantidad de fibras a utilizar.

**Figura 2. Elementos modelados**



Fuente. Propia

- Posterior a esto se procedió a definir las propiedades de densidad, y las propiedades elásticas de los materiales a utilizar (fique, concreto), esto debido a que se decidió trabajar únicamente en el rango elástico del concreto, para efectos del alcance de la tesis.

**Tabla 1. Propiedades de los materiales**

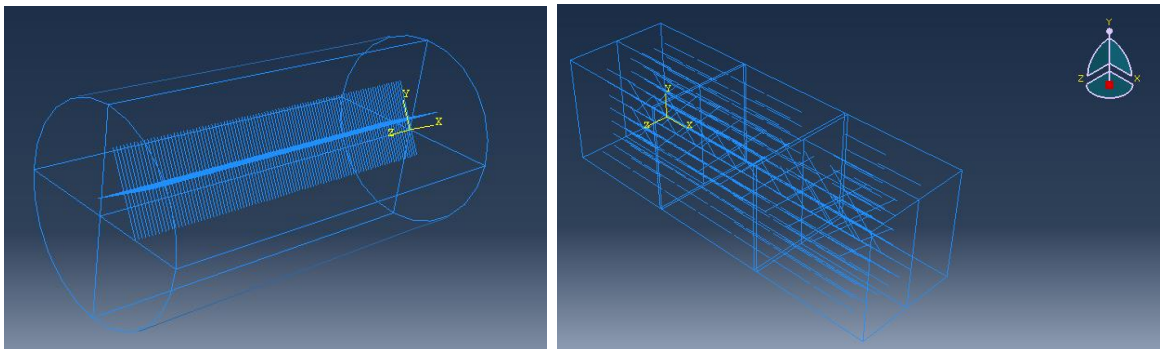
DATOS DEL CONCRETO	
Resistencia a la compresión (MPa)	28
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2.400,00
Densidad (N/mm <sup>3</sup> )	2,4E-05
Módulo de elasticidad (MPa)	24.870,06
Relación de poisson	0,2

DATOS DE LA FIBRA DE FIQUE	
Longitud recomendada fibra (mm)	60
Diámetro (mm)	0,25
Área de una fibra (mm <sup>2</sup> )	0,0491
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1,45
Densidad (Kg/mm <sup>3</sup> )	1,45E-06
Densidad (N/mm <sup>3</sup> )	1,42E-05
Módulo de elasticidad (MPa)	7.520,00
Relación de poisson	0,19

Fuente. Propia

- Posterior a la creación de los materiales se procede, a la asignación de los materiales y sus secciones transversales, a cada uno de los elementos que conforman el modelo.
- se procede a ensamblar cada uno de los elementos que conforman el modelo para poder crear un solo elemento. En este punto del modelado, es donde se ingresa la cantidad de fibras calculadas para cada uno de los porcentajes de fibra establecidos.

**Figura 3. Ensamble fibras de fique y concreto**

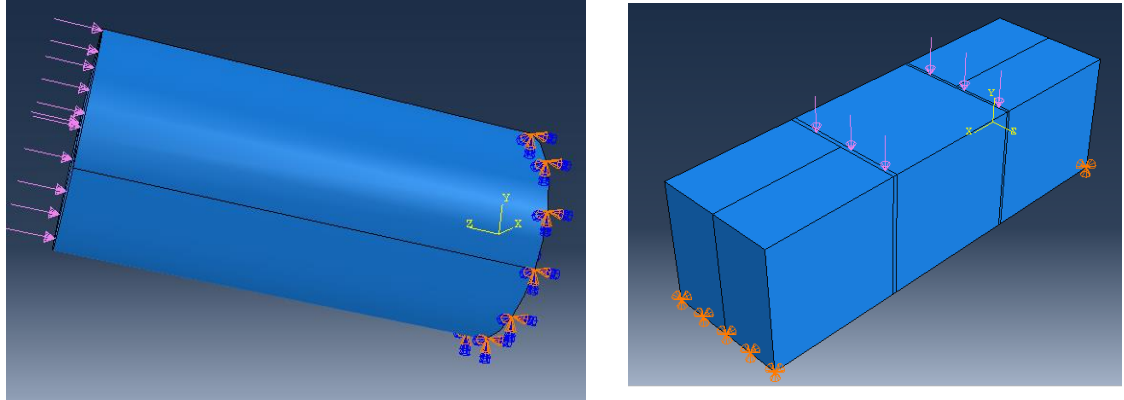


Fuente. Propia

- Una vez ensambladas las fibras dentro de cada uno de los modelos estructurales (vigas, cilindros), se procede a crear el tipo de análisis a correr por el programa, para el presente trabajo se tomó el análisis estático general.
- Los grados de incremento de la fuerza, lo que permitió ver en los resultados mediante la animación, como se aplicó la carga de manera gradual en los elementos, y como estos reaccionaban a través del tiempo.
- Para el caso de la viga se aplica un tipo de empotramiento del orden 2 y para el cilindro un empotramiento de orden 3. La carga aplicada al cilindro es de

tipo presión y la de la viga, son cargas lineales aplicadas en los tercios medios.

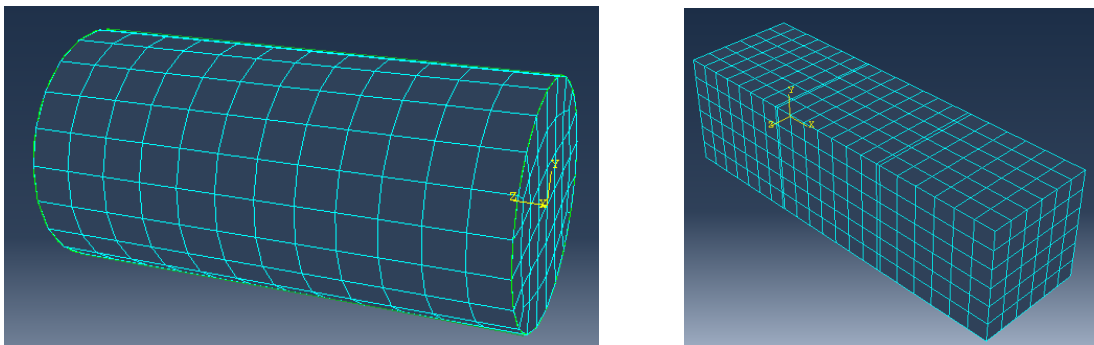
**Figura 4. Modelos cargados y empotrados.**



Fuente. Propia

- El mallado de los elementos, es necesario ya que permite dividir en partes más pequeñas el elemento, lo que permite realizar el análisis por elementos finitos. Es importante mallar las fibras y el cilindro de manera independiente, y con a la misma distancia, esto debido a condiciones de interacción del modelo con el software.

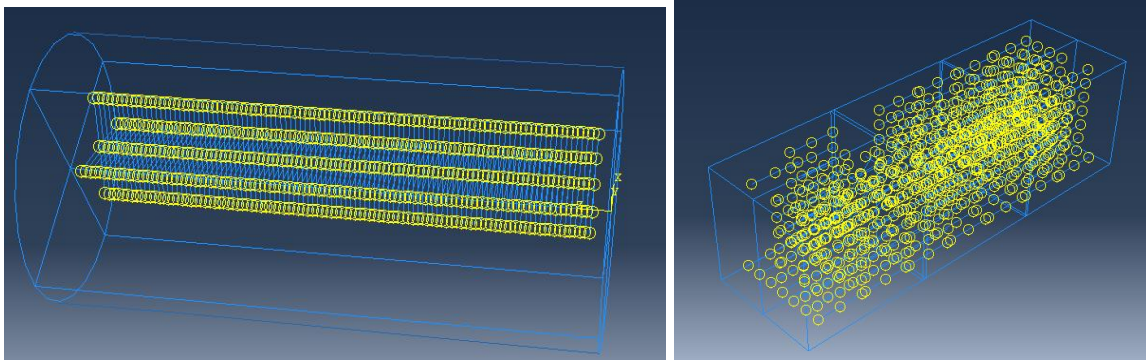
**Figura 5. Mallado de los elementos.**



Fuente. Propia

- Posterior al mallado se realiza la interacción de las fibras con el concreto, para crear un solo elemento, que será el concreto reforzado con fique.

**Figura 6. Interacción fibras y elemento de concreto.**



Fuente. Propia

- Finalmente se termina el modelo corriendo el análisis definido para los elementos, con cada una de sus cargas ya asignadas.

### **1.13 EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Los datos arrojados por el programa fueron esfuerzos y deformación, dentro del rango elástico de los elementos. Con estos datos se proceden a seleccionar para cada uno de los modelos el elemento más crítico en cuanto a deformación y esfuerzo, para así poder comprar este elemento con cada uno de los modelos construidos, en los cuales se varió el porcentaje de fibra. La comparación de los resultados se realizará con los modelos control, los cuales son un cilindro y una viga los cuales no tiene adición de fibra de fique. Esto nos permitió tener unos datos iniciales con los cuales, mediante un análisis gráfico - conceptual, se procede a determinar si el fique aporte una mejora frente a las deformaciones y los esfuerzos soportados por los elementos, y su varianza frente a los modelos de control. Es importante aclarar que el análisis se realiza de esta manera, ya que el elemento no se llevó hasta la rotura, debido al alcance de esta tesis se limita por la zona elástica del concreto, razón por la cual no se trabaja con módulos de rotura, ni resistencias a compresión y flexión.

### **1.14 ELABORACIÓN DE INFORME FINAL**

La elaboración del informe final del proyecto contendrá toda la información investigada, los resultados obtenidos junto con los respectivos análisis y conclusiones del comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibra natural Fique.

## 2 MARCO TEÓRICO

Cemento hidráulico: Para la selección del cemento se consultó la clasificación de los diferentes tipos de cementos hidráulicos, de la [17] la norma ASTM C 1157, de la cual se optó por usar:

- Cemento hidráulico de uso general – Cemento hidráulico para construcciones en general. Úselo cuando no se requieren uno o más tipos especiales.

Agua. El agua se puede definir como aquel componente del concreto que le permite al cemento, reaccionar de forma química que le dan propiedades de fraguar y endurecer al concreto [18]. En general según la [19]NTC 3459, el agua a utilizar debe ser clara y de apariencia limpia, libre de cantidades perjudiciales de aceites, ácidos y sales que perjudiquen la calidad del agua. Esta puede ser tomada de fuentes naturales, siempre y cuando cumplas con las condiciones indicadas.

Agua de mezclado. Se define como la cantidad de agua por volumen unitario requerida por el concreto, para producir una pasta eficientemente hidratada, que permita una fluidez tal de la mezcla, que se permita una lubricación eficiente de los agregados en la pasta cementicia, en su estado plástico.

Una vez integrados los agregados a la pasta de cemento, va adquiriendo una estructura llamada gel de cemento a medida que este se va hidratando, en este estado el agua se encuentra en dos formas básicas:

- Agua de hidratación (Agua no evaporable)
- Agua evaporable

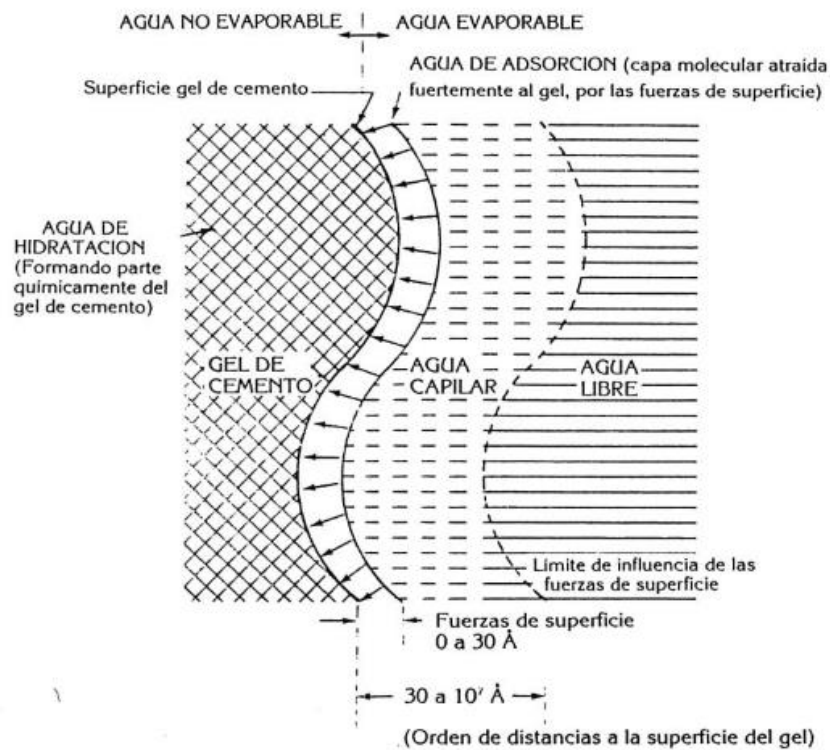
Agua de hidratación. Parte del agua original de mezclado que reacciona químicamente con el cemento para formar parte del gel de cemento.

Agua evaporable. Corresponde al agua restante que existe en la pasta, esta agua puede evaporarse a 0% de humedad relativa, pero no se encuentra libre en su totalidad. El agua evaporable puede estar en tres condiciones, según su proximidad a la superficie del gel cementante, ver figura 2

- Agua de adsorción
- Agua libre
- Agua capilar



**Figura 7. Esquema de la ubicación del agua en la pasta de cemento hidratado**



Fuente. [18]

Agua de adsorción. Capa de agua fuertemente adherida a las superficies del gel por fuerzas de atracción intermolecular.

Agua libre. Tiene completa movilidad y puede evaporarse con facilidad, debido a su distancia con respecto al área de influencia de las fuerzas de superficie.

Agua de curado. El agua de curado tiene como función garantizar las condiciones necesarias de hidratación, que debe poseer el concreto durante este proceso para que se hidrate de manera ininterrumpida hasta que el concreto alcance sus propiedades potenciales. Este suministro de agua de curado depende en gran medida a condiciones climáticas de humedad y temperatura, debido a que el agua libre se evapora mayormente cuanto es menor la humedad.

Siempre se recomienda usar agua potable, que no tenga un pronunciado olor o sabor, debido a que esto podría evidenciar altas concentraciones de sales, cítricos o azúcares disueltos que pueden ser perjudiciales para el concreto. Estas afectaciones pueden ser aumentos en tiempos de fraguado, eflorescencias en el concreto, corrosión en el acero [18]

Cuando no se conozca la procedencia del agua, se puede realizar pruebas en las que se establezcan las cantidades de cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos dentro del agua de mezclado, así como verificar la cantidad de sólidos disueltos, ya que si estas aguas contienen más de 2000 ppm de sólidos disueltos, deberán ser ensayadas para verificar sus afectaciones en cuanto a resistencia y fraguado del concreto, se recomienda para verificar la calidad del agua la realización del ensayo de la [20] NTC 220.

Agregado. El agregado fino representa entre un 70-80% del volumen total del concreto [18], estos son de gran importancia ya que el comportamiento del concreto tanto en estado plástico como endurecido, depende en gran parte del tipo de agregado utilizado, y sus características morfológicas.

### Clasificación de los agregados

Los agregados pueden clasificarse principalmente en función de:

- Su tamaño.
- Su procedencia.
- Su densidad.

Por su tamaño. Los agregados se pueden clasificar en función de su tamaño en agregados finos y agregados gruesos. Esta distribución de las partículas se conoce como análisis granulométrico y se puede realizar mediante tamizado [21] I.N.V.E 123. La clasificación según el tamaño es la siguiente, ver tabla 3

**Tabla 2. Clasificación general del agregado según su tamaño**

Tamaño de las partículas en mm (pulg.)	Denominación más corriente	Clasificación	Clasificación como agregado para concreto
Inferior a 0,002	Arcilla	Fracción muy fina	No recomendable
Entre 0,002 - 0,074 (No. 200)	Limo		
Entre 0,074 - 4,76 (No. 200) - (No. 4)	Arena	Agregado fino	Material apto para producir concreto
Entre 4,76 - 19.1 (No. 4) - (3/4")	Gravilla	Agregado grueso	
Entre 19.1 - 50.8 (3/4") - (2")	Grava		
Entre 50.8 - 152.4 (92") - (6")	Piedra		
Superior a 152.4 (6")	Rajón, piedra bola		

Fuente. [18]

Su procedencia. Los agregados según su procedencia pueden clasificarse como artificiales y naturales.

Agregados naturales: Son aquellos provenientes de fuentes naturales como arenas, gravas de río, cantos rodados, y agregados de canteras. Estos pueden tener una granulometría natural aprovechable o se puede modificar de forma mecánica, mediante trituración según sean las necesidades.

Agregados artificiales: Son aquellos agregados obtenidos a partir de productos y procesos industriales. Por lo general estos agregados son más ligeros o pesados que los agregados naturales, según las necesidades del concreto.

Su densidad. Es importante conocer la densidad del agregado a utilizar ya que este depende del volumen de los poros del agregado, y afecta la densidad del concreto que se desea producir (ligero, normal o pesado), ver tabla 4

**Tabla 3. Clasificación del agregado según su densidad**

<i>Tipo de concreto</i>	<i>Peso unitario aprox. del concreto kg/m³</i>	<i>Peso unitario del agregado kg/m³</i>	<i>Ejemplo de utilización</i>	<i>Ejemplo de agregado</i>
Ligero	400-800	60-480	Concreto para aislamientos	Piedra pómez
	950-1.350	480-1.040	Concreto para rellenos y mampostería no estructural	Perlita
	1.450-2.000		Concreto estructural	
Normal	2.000-2.500	1.300-1.600	Concreto estructural y no estructural	Canto rodado Agregados de río
Pesado	2.500-5.600	3.400-7.500	Concreto para protección contra radiación gamma o X, y contrapesas	Piedra barita, magnetita

Fuente. [18]

## 2.1 MARCO LEGAL

Para la realización del presente proyecto se utilizarán las siguientes normas:

- [17] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), "ASTM C1157," *Stand. Perform. Specif. Hydraul. Cem.*, 2003.
- [19] ICONTEC, "NORMA TECNICA NTC COLOMBIANA 3459," 2001. [Online]. Available: [https://www.academia.edu/30427756/NTC\\_3459\\_Agua\\_elaboración\\_concreto\\_](https://www.academia.edu/30427756/NTC_3459_Agua_elaboración_concreto_).
- [20] ICONTEC, "NORMA TECNICA NTC COLOMBIANA 220," 2007. [Online]. Available: <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC2681.pdf>.
- [21] I. N. de V. INVIAS, "ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO I.N.V.E - 123 - 07," *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 137, no. 254 mm, pp. 1–2, 2006, doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000373.

### 3 ESTADO DEL ARTE

Durante la última década, se han realizado numerosos estudios sobre concretos con adición de fibras naturales, sintéticas, y metálicas. En cuanto al concreto con adición de fibras naturales, se han probado diferentes materiales como estopa de coco [13], lechuguilla [14], fique entre otras.

El estudio de las fibras sintéticas y metálicas alrededor del mundo ha tenido un gran auge, debido a las mejoras que están pueden presentar en la matriz de concreto. En el estudio “*Research on the Dynamic mechanical properties and constitutive models of Steel fiber reinforced concrete and polypropylene fiber reinforced concrete*” [22], desarrollado en el año 2019 se analizó el efecto de estas fibras en las propiedades dinámicas mecánicas del concreto (deformación máxima, tensión máxima, tenacidad), sometido a cargas de impacto de compresión. Adicional a esto se determina cual fibra es más adecuada para el concreto desde los aspectos de rendimiento y economía. En el estudio se varió la cantidad de fibras de polipropileno y de acero, para así estimar cuanto el porcentaje de fibras afectaba las propiedades mecánicas del concreto, para esto se construyeron curvas de esfuerzo deformación, con cada una de las probetas fabricadas y se realizaron los respectivos análisis, los cuales tuvieron como conclusión que efectivamente las fibras de polipropileno y de acero, presentaron una tendencia general entre los contenidos de fibra y la resistencia dinámica a la compresión de aumentar, al igual que la tensión máxima. Como resultado se pudo obtener que para el concreto con adición de fibras de polipropileno se tuvieron unos aumentos deformación máxima, tensión máxima y tenacidad (13.1%-33.7%-107.4%) con respecto a un concreto simple, para el concreto con adición de fibras de acero se presentaron aumentos en deformación máxima, tensión máxima y tenacidad (32.1%-31.1%-106.8%) con respecto a un concreto simple, estos resultado reflejan las bondades del uso de fibras sintéticas y metálicas en un concreto simple. En cuanto al aspecto económico se estableció que es más favorable económicamente hablando para un concreto el uso de fibras de polipropileno que las de acero, ya que las fibras de acero presentan un aumento en el costo del concreto simple de 55 veces su valor original. En cuanto al rendimiento las fibras de acero al presentar mejores propiedades físicas y mecánicas que las fibras de polipropileno, tuvieron un rendimiento mucho mayor siendo de 0.6 kg/m<sup>3</sup> a 1.5 kg/m<sup>3</sup> volumen usado para el concreto, frente a los 40 kg/m<sup>3</sup> a 200 kg/m<sup>3</sup> del polipropileno, para alcanzar los resultados presentados.

El uso de fibras naturales como reemplazo de las fibras sintéticas y metálicas en el concreto, ha presentado un gran avance alrededor del mundo, gracias a su menor costo y abundancia. En el estudio “*Performance of lightweight natural-fiber*

*reinforced concrete*” [23] presentado en el año 2017, se analizó como las fibras de coco pueden mejorar las propiedades de tracción en el concreto ligero. Se selecciono fibras de coco al ser una fibra que está presente en abundancia alrededor del mundo, y la cual es tomada como un desperdicio. Esta fibra presenta cualidades como su protección única frente a la degradación microbiana y al agua salada, al igual que al mezclarse con el concreto presenta una reducción de su temperatura en un 30%, controla la propagación de las grietas y puede reducir el peso total del concreto.

En el estudio se utilizaron diferentes porcentajes de fibras de coco, para encontrar así cual porcentaje de fibra presenta las mejores condiciones para el aumento de las propiedades en el concreto ligero, encontrándose que al adicionarse un 0.175% de fibras de coco con respecto al % del peso de cemento, la resistencia a la flexión del concreto aumento en un 76%. Cuando la adición de fibras de coco aumento a un 0.25% con respecto al % del peso del cemento, se evidencio que el concreto presentaba un módulo de rotura igual que el de un concreto liviano normal, por lo cual para futuros trabajos se propuso como conclusión determinar dentro del rango de 0.175%-0.25%, el porcentaje óptimo de fibra de coco que mejoraría en mayor medida la resistencia a la flexión del concreto liviano.

La Universidad de Kasen Bundit de Tailandia realizo una investigación de experimental sobre “Mechanical Properties of Fiber Reinforced Concrete” en donde se analizaron las propiedades mecánicas del hormigón reforzado con sisal y fibra de vidrio.

Se consideraron cuatro mezclas básicas de hormigón:

- 1) Hormigón simple (PC) que contiene agregados naturales ordinarios sin fibras.
- 2) Hormigón reforzado con fibra de sisal o fique (SFRC).
- 3) Hormigón reforzado con sisal o fique y fibra de vidrio (SGFRC).
- 4) Hormigón reforzado con fibra de vidrio (GFRC).

Las propiedades investigadas fueron:

- La resistencia a la compresión.
- La resistencia a la tracción por división.
- La resistencia a la tracción por flexión y la trabajabilidad.

Los resultados de las mezclas de hormigón reforzado con fibra se compararon con el hormigón simple para investigar el efecto de las fibras en las propiedades mecánicas del hormigón reforzado con fibra. Se determinó que la adición de diferentes tipos de fibras (naturales y sintéticas) es muy útil para producir hormigón. La adición de fibras dio como resultado una mayor resistencia a la compresión, a la rotura y a la tracción. Sin embargo, la trabajabilidad del hormigón reforzado con fibras se encontró más baja que la del hormigón simple debido a la adición de fibras

en el hormigón [24]. De este documento se tomó el diámetro de la fibra de Sisal (0.25 mm) como dato de entrada para la tesis presentada en este documento.

Por otra parte, la unidad de Materiales, Centro de Investigación Científica de Yucatán, realizaron una caracterización mecánica del hormigón celular simple (PFC) y el hormigón celular espumado reforzado con fibra (FRFC) con una densidad de 700 kg / m<sup>3</sup> se realizó con ensayos de compresión y tracción.

El FRFC se reforzó con la fibra natural de henequén o fique, la cual una parte sin tratar y otra con tratamiento alcalino, en fracciones de volumen de 0,5%, 1% y 1,5%. También se utilizó como referencia el refuerzo de fibra de polipropileno. Para todos los FRFC, la inclusión de las fibras mejoró las resistencias a la compresión, la tracción y el comportamiento plástico, lo que se le atribuyó a la mejora de la integridad de la muestra.

Bajo carga de compresión, después del pico de resistencia, no hubo una pérdida considerable de resistencia y se observó un régimen similar a una meseta. Bajo carga de tracción, las fibras aumentaron significativamente la resistencia a la tracción de los FRFC y evitaron una falla repentina de las muestras, lo que contrastaba con el comportamiento frágil del PFC.

La mejora del comportamiento de tracción fue mayor cuando se utilizaron fibras de henequén tratadas, lo que se atribuyó al aumento de la unión fibra-matriz producido por el tratamiento alcalino. La caracterización microscópica mostró que la inclusión de fibras no modificó el tamaño del vacío de aire y su distribución. Se observó una mayor absorción de energía para los FRFC en comparación con el PFC, lo que se atribuyó a la mayor tenacidad y ductilidad de las fibras [25].

El estado del arte sobre esta última fibra natural (fique), se han elaborado innumerables estudios en los que se analizó el comportamiento mecánico del concreto, con diferentes porcentajes de adicción de fique en vigas y cilindros, lo que ha permitido establecer porcentaje ideales de adicción de fibra como es el estudio Análisis De La Resistencia A Compresión y Flexión Del Concreto Modificado Con Fibra De Fique, desarrollado por la universidad Piloto de Colombia [15] en el cual el concreto presento mejoras a sus propiedades mecánicas, al ser agregada la fibra suelta directamente a la mezcla de concreto en diferentes porcentajes de concentración 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%.

Recientemente se ha explorado el uso de fibras naturales de fique en losas de concreto, como lo realizo la Universidad Nacional De Colombia [8] en su estudio Mechanical Behavior Of Natural Fiber Textile Reinforced Mortar Sheets, donde se analizó el comportamiento a flexión de láminas de mortero reforzado con mallas de fique, ejecutando una serie de pruebas a losas de concreto con mallas de fique, en las cuales se varió el espaciamiento entre fibras, y se realizó una comparación de

los resultados obtenidos, dando como conclusiones que las mallas de fique presentan excelentes mejoras a las losas de concreto al ser evaluadas a flexión; pero este trabajo estuvo limitado a una sola distribución de la malla y no abordaron otras distribuciones geométricas. Dicho estudio menciona que a pesar de que no se evaluó es importante tener en cuenta para futuras investigaciones la degradación de las fibras naturales, a causa de la alcalinidad del concreto la cual a largo plazo afecta las propiedades mecánicas del concreto.

Gracias a la anterior información en la cual se encuentra el estudio del concreto con adición de fibras naturales, específicamente la fibra de fique, se plantea evaluar el comportamiento mecánico y los efectos que las fibras de fique revestidas causan sobre el concreto.

En las losas se verificará el comportamiento mecánico del concreto con dos distribuciones de mallas de forma ortogonal y eslabonada, lo que permitirá analizar como la distribución de la malla afecta el comportamiento a flexión de una losa de concreto con adición de fique.

Para el caso de las vigas se pretende usar el fique como refuerzo longitudinal de la viga, lo que permitirá analizar como varía el comportamiento mecánico del concreto en vigas, al ser dispuesto de diferentes maneras la fibra de fique.

Para el caso de los cilindros, se trabajará con diferentes porcentajes de adición de fibra, los cuales hasta el momento no han sido utilizados y, así verificar el comportamiento mecánico del concreto con dichos porcentajes de fibra, y establecer si mejoraron las propiedades mecánicas, o por el contrario no le aportaron valor alguno al concreto.

Los datos de entrada como lo fueron longitud, módulo de elasticidad y porcentaje máximo de fibra de fique a utilizar, se tomaron de la tesis desarrollada por la Universidad Piloto de Colombia-Seccional Magdalena [15], en este documento se analizó la resistencia a la compresión y flexión del concreto con adición de fibra de fique, en este trabajo realizado se utilizaron cilindros y vigas de concreto, los cuales fueron expuestos a diferentes cargas de compresión y flexión en el laboratorio, hasta la rotura de cada uno de los elementos. Como resultados de los ensayos a compresión con diferentes porcentajes de fibra fique (0.5%, 1%, 1.5%, 2%), se verificó que las probetas con diseñadas con diferentes diseños de mezcla que iban desde 14 MPa hasta 28 MPa, presentaban menores capacidades de resistencia a la compresión a medida que se aumentaba el porcentaje de fique, razón por la cual se decidió tomar un valor de 0.3%, con el cual se observó que para una mezcla de concreto de 28 MPa, los cilindros con adición de 0.3% de fibra de fique a los 28 días alcanzaron una resistencia de 29.06, superando la resistencia para la cual la mezcla fue diseñada. A partir de estos resultados concluyeron que con valores superiores al 0.3% de contenido de fique en el concreto, se presentaban desmejoras en su



capacidad mecánica a compresión, adicional a esto en términos de manejabilidad de la mezcla con porcentajes superiores al 1% de fibra fique, se complicaba la manejabilidad de la misma, esto debido a la cantidad de aire generado, lo que reduce su densidad. En el ensayo a flexión de las vigas, se observó un comportamiento similar en cuanto al ensayo a compresión, donde se obtuvo que el contenido de fique superior al 0.3%, no le presentaba mejoras al elemento a flexión sino al contrario disminuía su módulo de rotura. Para las vigas con contenido de fibra de fique del 0.3%, se observó que, para una mezcla de concreto de 28 MPa, la resistencia alcanzada a los 28 días por los elementos fue de 31 MPa, lo que se traduce en un incremento del 9.68% en su resistencia a flexión de diseño. Es importante tener en cuenta las conclusiones y recomendaciones generadas por esta investigación, entre las que se destacan *“Las fibras de fique le dan al concreto la capacidad de cohesión, observándose que aun en la fractura de la viga, la fibra de fique sigue adherida a la matriz de la viga por la acción de la presión”*, como recomendación se destaca *“Se recomienda trabajar con cantidades iguales o inferiores a 0.3% de fibra de fique con respecto al peso del agregado fino”*.

Del documento Modelo Numérico para el Análisis del comportamiento de materiales cementicios reforzados con fibras naturales [26], en este documento se estudió el análisis del comportamiento mecánico del concreto reforzado con diferentes fibras naturales, para así establecer la mejor combinación que permita un material eco-amigable, con propiedades mejoradas tanto mecánicas como térmicas. Dentro de las fibras estudiadas se encuentran el Jute, Curaua, y el Sisal (Fique), dentro del documento se establece el comportamiento mecánico del concreto con fibras largas y cortas, y así mismo establecer cual fibra es la más conveniente para el concreto, dentro de los datos experimentales que son de gran importancia para nuestra tesis, y que fueron tomados de este documento encontramos la relación de Poisson 0.19. Es importante destacar de este documento que las fibras cortas de Sisal presentaron una mayor ductilidad y tenacidad en la matriz del concreto, frente a las fibras largas, lo que nos indica que las fibras aportan en el aumento de la capacidad resistente del concreto, antes de alcanzar la rotura.

## 4 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO TIPO CILINDRO

Para elaborar el cilindro a modelar en el programa ABAQUS, se tomaron datos de la tesis de la Universidad Piloto de Colombia-Seccional Magdalena [15].

**Tabla 4.Datos del concreto**

DATOS DEL CONCRETO	
Resistencia a la compresión (Mpa)	28
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2,400.00
Densidad (N/mm <sup>3</sup> )	2.4E-05
Modulo de elasticidad (Mpa)	24,870.06
Relación de poisson	0.2

Fuente. Propia

**Tabla 5.Datos de la fibra fique**

DATOS DE LA FIBRA DE FIQUE	
Longitud recomendada fibra (mm)	60
Diámetro (mm)	0.25
Área de una fibra (mm <sup>2</sup> )	0.0491
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.45
Densidad (Kg/mm <sup>3</sup> )	1.45E-06
Densidad (N/mm <sup>3</sup> )	1.42E-05
Modulo de elasticidad (Mpa)	7,520.00
Relación de poisson	0.19

Fuente. Propia

Nota:

- Los datos de densidad (g/m<sup>3</sup>) y relación de poisson se tomaron del documento [27]
- La longitud recomendada de la fibra de fique en (mm), se tomó del documento [15]

#### 4.1 DOSIFICACIÓN DE FIQUE PARA LA MATRIZ DE CONCRETO

Para asignar la cantidad de fibra de fique a ser adicionada al concreto se tomaron proporciones utilizadas en el ensayo experimental, realizado por la Universidad Piloto de Colombia- Seccional Magdalena [15]

En este ensayo se recomienda un porcentaje de fibra de fique del 0.3% del peso del agregado fino, el cual representa en masa un valor del 3.3 kg/m<sup>3</sup> de fibra. El presente trabajo partió de este valor para asignar las proporciones de fibra, variándolas desde 0,3%, 0,2%, 0,1% hasta el concreto sin adición para realizar el comparativo de los resultados.

**Tabla 6. Dosificación fibra de fique**

<b>Dosificación recomendada de fique, según ensayo experimental</b>	
% fibra de fique con respecto al agregado fino	0.3
Masa equivalente al porcentaje (kg/m <sup>3</sup> )	3.3

Fuente. Propia

#### 4.2 CÁLCULO PARA EL ELEMENTO CILINDRICO

**Tabla 7. Dimensiones del cilindro**

<b>DIMENSIONES CILINDRO</b>	
Altura (m)	0.3
Diámetro (m)	0.15
Área (m <sup>2</sup> )	0.01767
Área (mm <sup>2</sup> )	17671.5
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.0053

Fuente. Propia

Posterior a esto se procedió a calcular la cantidad de fibra de fique necesaria para el volumen del elemento cilíndrico.

**Tabla 8. Cantidad de fibra de fique - Cilindro**

MASA DE FIQUE PARA EL CILINDRO		
$\frac{3.3 \text{ Kg}}{X} = \frac{1 \text{ m}^3}{0.005 \text{ m}^3}$	0.0175	Kg

Fuente. Propia

Se cálculo el área perpendicular que debería ocupar la cantidad de fibra en el cilindro, para luego dividirla por el área de una fibra y de esta manera determinar la cantidad de fibras por unidad que se modelarían.

1. Se utilizó la ecuación de densidad, donde se despejó el volumen ya que tenían los datos de masa y densidad.
2. Se calculó el volumen.
3. Se calculó el radio.
4. Se calculó el área general del contenido de fique.

**Tabla 9. Área transversal fibras de fique a utilizar**

Densidad (kg/mm3)	$\rho = \frac{m}{v}$		1.45E-06
Volumen (mm3)	$v = \frac{m}{\rho}$	$V = \frac{0.0175 \text{ Kg}}{1.45e^{-6} \text{ Kg/mm}^3}$	12,065
Radio (mm)	$r = \sqrt{\frac{v}{\pi * h}}$	$r = \sqrt{\frac{23275,86 \text{ mm}^3}{\pi * 60 \text{ mm}}}$	8
Área (mm2)	$A = \pi * r^2$	$A = \pi * 11,1125 \text{ mm}^2$	201

Fuente. Propia

Para determinar el número de fibras a modelar se dividió el área general del contenido de fique 201  $mm^2$ , entre el área de la fibra de fique 0.0491  $mm^2$  \* 20, con el objetivo de aumentar el grosor de la fibra y tener un número considerable a modelar para el programa.

**Tabla 10. Número de fibras para el cilindro**

Número de fibras de fique	
$\#fibras = \frac{\text{Área total}}{\text{Área de una fibra}}$	205

Fuente. Propia

### 4.3 CÁLCULO DE LA FUERZA A APLICAR EN EL MODELO

Para determinar la fuerza se despejo de la ecuación de esfuerzo, se tomó el dato de resistencia máxima a la compresión del ensayo experimental de la tesis desarrollada por la Universidad Piloto de Colombia-Seccional Magdalena [15] y se dividió entre el área del cilindro.

**Tabla 11. Fuerza a aplicar al cilindro**

CÁLCULO DE LA FUERZA A APLICAR		
<b>Resistencia máxima a compresión</b>	<b>(PSI)</b>	<b>MPa</b>
	4152	29.06
$\text{Esfuerzo máx.} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área}}$	Fuerza = Esfuerzo máx. * Área cilindro	
Fuerza aplicar en el modelo	513532.5891	N

Fuente. Propia

## 5 RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL CILINDRO

### 5.1 CILINDRO SIN ADICIÓN DE FIBRA

A Continuación, se muestran los resultados generados por el programa ABAQUS, donde para el análisis de resultados se tomaron los elementos más críticos del mallado del cilindro.

Las particiones con mayor esfuerzo (MPa) son:

- Elemento 116 a tracción.
- Elemento 284 a compresión (se analizó este elemento)

La partición con mayor deformación (mm):

- Elemento 101

**Tabla 12. Resultados exportados de abaqus- Cilindro de control**

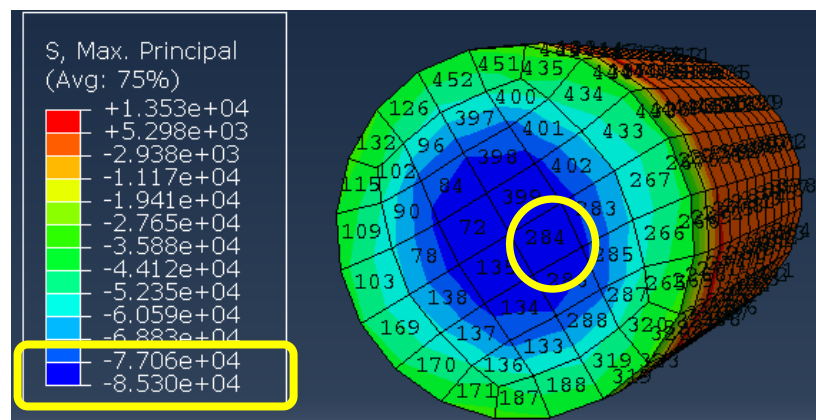
CONCRETO 28 (MPa) 0% DE FIBRA DE FIQUE						
ODB: C:/temp/Job- 1.odb Step: Step-1 Frame: Increment 1: Step Time = 0.1000						
Element Label	Int	DEFORMACIÓN		ESFUERZO		
		E.Max. Prin	E.Min. Prin	S.Mises	S.Max. Prin	S.Min. Prin
101	1	0.47	2.18	53,599.70	201.16	54,598.80
284	1	0.12	1.82	40,090.00	8,533.76	48,672.60
<b>Minimum</b>		0.1177	2.18	40,090	8,533.76	55,530.50
<b>At Element</b>		284	101	284	284	265
Int Pt		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
<b>Maximum</b>		0.466	1.82	53,599.70	1,353.42	48,515.90
<b>At Element</b>		101	284	101	116	116
Int Pt		1	1	1	1	1
Total		213	1,086	26,798,500	222,823	27,134,800

Fuente. Propia

### 5.1.1 Esfuerzo a la compresión máxima principal

Se muestra la imagen del modelo donde se señala la partición 284 con el mayor esfuerzo a la compresión en la cara del empotramiento. La partición esta sombreada de color azul con lo que se puede revisar la magnitud del esfuerzo entre  $(-7.706e+04$  y  $-8.530e+04)$ , lo cual coincide con el valor arrojado por el programa de S. Max: 85,337 (MPa).

**Figura 8. Modelo cilindro sin adición de fibra-esfuerzo máximo**



Fuente. Propia

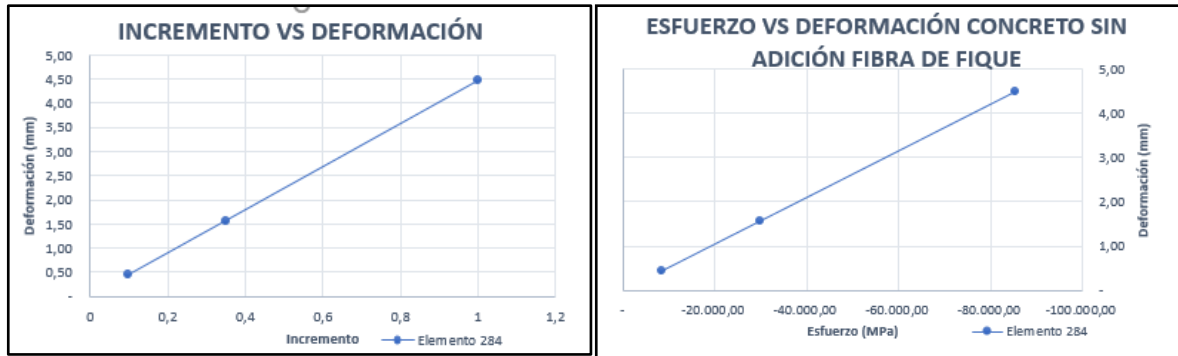
**Tabla 13. Elemento con mayor esfuerzo en el cilindro sin adición de fibra**

ELEMENTO CON MAYOR ESFUERZO				
% DE FIBRA	ELEMENTO	INCREMENTO	ESFUERZO (MPa)	DEFORMACIÓN (mm)
0%	284	0.1	- 8,533.76	0.45
		0.35	- 29,868.20	1.57
		1	- 85,337.60	4.48

Fuente. Propia

Las gráficas de los resultados son en forma lineal, ya que en el presente trabajo solo se trabajó el rango elástico.

**Figura 9. Gráficas elemento con mayor esfuerzo cilindro sin adición de fibra**

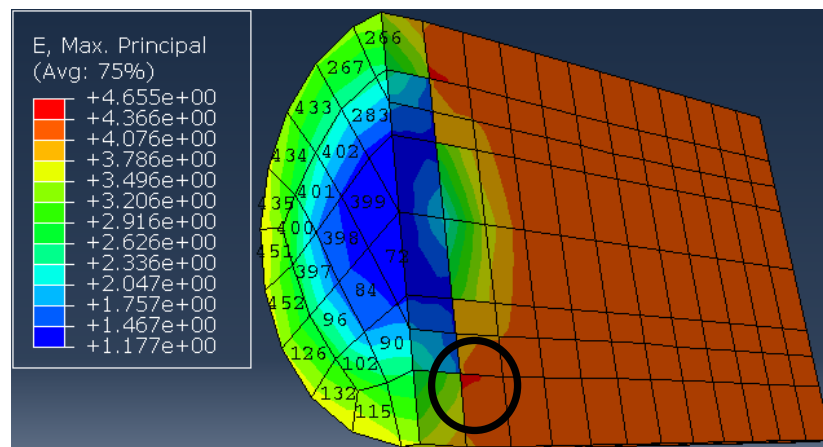


Fuente. Propia

### 5.1.2 Deformación máxima principal

Se muestra la imagen del modelo donde se señala la partición 101 con la mayor deformación. La partición esta sombreada de color rojo con lo que se puede revisar la magnitud de la deformación entre (4.36 y 4.655), lo cual coincide con el valor arrojado por el programa de E. Max: 4.655 (mm).

**Figura 10. Modelo cilindro sin adición de fibra-deformación máxima**



Fuente. Propia



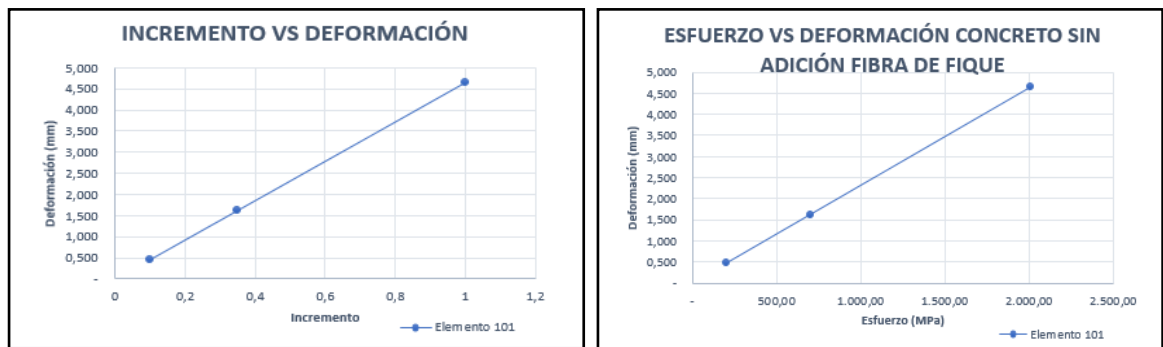
**Tabla 14. Elemento con mayor deformación en el cilindro sin adición de fibra**

ELEMENTO CON MAYOR DEFORMACIÓN				
% DE FIBRA	ELEMENTO	INCREMENTO	ESFUERZO (MPa)	DEFORMACIÓN (mm)
0%	101	0.1	201.16	0.466
		0.35	704.05	1.629
		1	2,011.56	4.655

Fuente. Propia

Las gráficas de los resultados son en forma lineal, ya que en el presente trabajo solo se trabajó el rango elástico.

**Figura 11. Gráficas elemento con mayor deformación cilindro sin adición de fibra**



Fuente. Propia

## 5.2 CILINDRO CON ADICIÓN DE 0.1% DE FIBRA

Tabla 15. Número de fibras con el 0.1% de fique

Número de fibras de fique	
$\#fibras = \frac{\text{Área total}}{\text{Área de una fibra}}$	62

Fuente. Propia

A Continuación, se muestran los resultados generados por el programa ABAQUS, donde para el análisis de resultados se tomaron los elementos más críticos del mallado del cilindro.

Las particiones con mayor esfuerzo (MPa) son:

- Elemento 116 a tracción
- Elemento 284 a compresión (se analizó este elemento)

La partición con mayor deformación (mm):

- Elemento 101
- 

Tabla 16. Resultados exportados de abaqus- Cilindro con 0.1% de fique

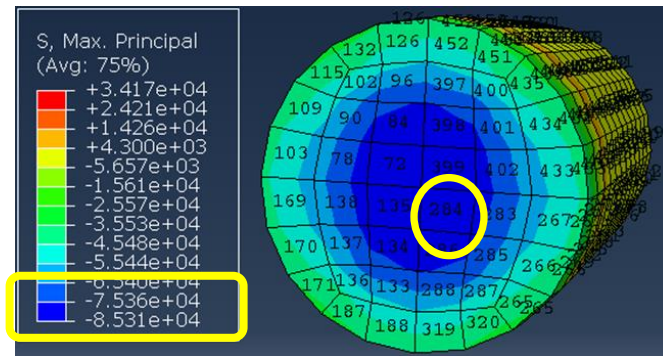
CONCRETO 28 (Mpa) 0.1% DE FIBRA DE FIQUE						
ODB: C:/temp/Job 1.odb Step: Step-1 Frame: Increment 1: Step Time = 0.1000						
Element Label	Int	DEFORMACIÓN		ESFUERZO		
		E.Max. Prin	E.Min. Prin	S.Mises	S.Max. Pri	S.Min. Prin
101	1	0.47	- 2.18	53,599.00	202.21	- 54,598.40
284	1	0.12	- 1.82	40,089.00	- 8,537.30	- 48,674.10
<b>Minimum</b>						
At Element		284	101	284	284	265
Int Pt		1	1	1	1	1
<b>Maximum</b>						
At Element		101	284	101	116	116
Int Pt		1.00E+00	1.00E+00	1	1.00E+00	1
Total		212.92	- 1,085.58	26,798,000.0	- 223,313	- 27,134,800

Fuente. Propia

### 5.2.1 Esfuerzo a la compresión máxima principal

Se muestra la imagen del modelo donde se señala la partición 284 con el mayor esfuerzo a la compresión en cara del empotramiento. La partición esta sombreada de color azul con lo que se puede revisar la magnitud del esfuerzo entre  $(-7.706e+04$  y  $-8.531e+04)$ , lo cual coincide con el valor arrojado por el programa de s. Max: 85,373 (MPa).

**Figura 12. Modelo cilindro con 0.1% adición de fibra-esfuerzo máximo a la compresión**



Fuente. Propia

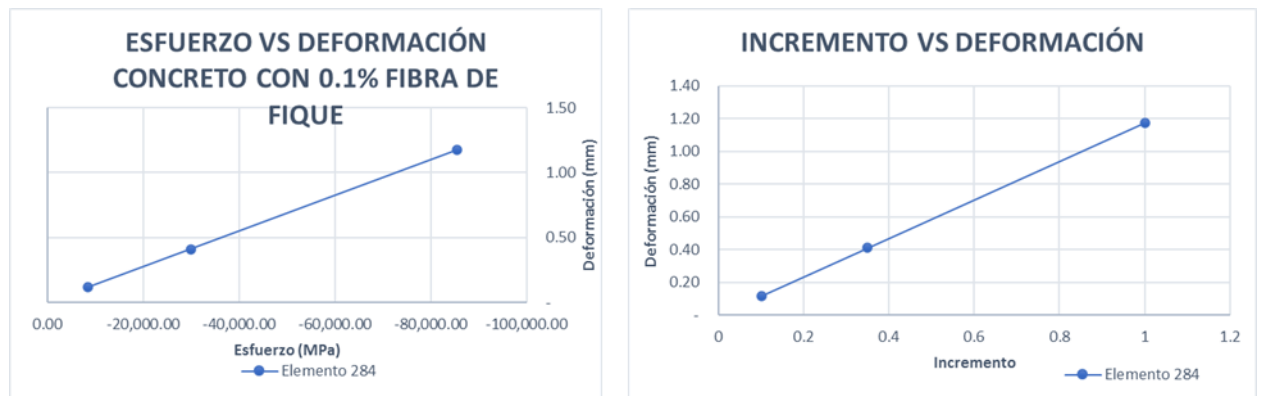
**Tabla 17. Elemento con mayor esfuerzo en el cilindro con adición de 0.1% de fibra.**

ELEMENTO CON MAYOR ESFUERZO				
PORCENTAJE DE FIBRA	ELEMENTO	INCREMENTO	ESFUERZO (MPa)	DEFORMACIÓN (mm)
0.1%	284	0.1	- 8,537.30	0.12
		0.35	- 29,880.50	0.41
		1	- 85,373.00	1.18

Fuente. Propia

Las gráficas de los resultados son en forma lineal, ya que en el presente trabajo solo se trabajó el rango elástico.

**Figura 13. Gráficas elemento con mayor esfuerzo cilindro con adición de 0.1% fibra**

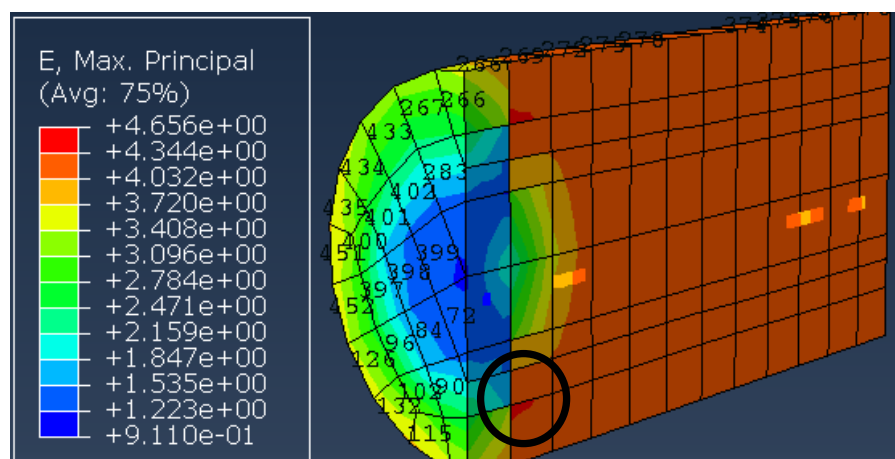


Fuente. Propia

### 5.2.2 Deformación máxima principal

Se muestra la imagen del modelo donde se señala la partición 101 con la mayor deformación. La partición esta sombreada de color rojo con lo que se puede revisar la magnitud de la deformación entre (4.344 y 4.656), lo cual coincide con el valor arrojado por el programa de E. Max: 4.656 (mm).

**Figura 14. Modelo cilindro con adición de 0.1% fibra-deformación máxima**



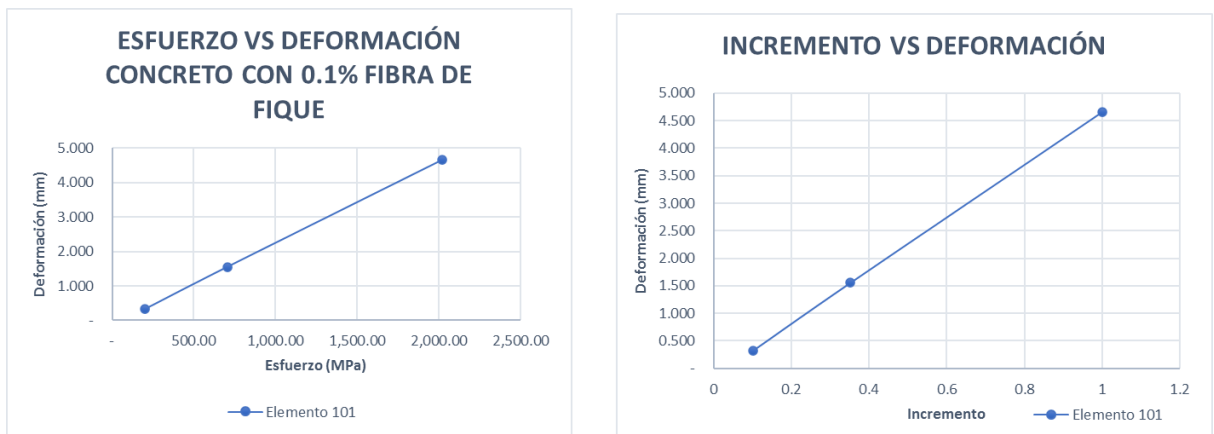
Fuente. Propia

**Tabla 18. Elemento con mayor deformación en el cilindro con adición de 0.1% fibra**

ELEMENTO CON MAYOR DEFORMACIÓN				
PORCENTAJE DE FIBRA	ELEMENTO	INCREMENTO	ESFUERZO (MPa)	DEFORMACIÓN (mm)
0.1%	101	0.1	202.21	0.326
		0.35	707.75	1.553
		1	2,022.13	4.656

Fuente. Propia

**Tabla 19. Gráficas elemento con mayor deformación cilindro con adición de 0.1% fibra**



Fuente. Propia

### 5.3 CILINDRO CON ADICIÓN DE FIBRA DE 0.2%

Tabla 20. Número de fibras con el 0.2% de fique

Número de fibras de fique	
$\#fibras = \frac{\text{Área total}}{\text{Área de una fibra}}$	124

Fuente. Propia

A Continuación, se muestran los resultados generados por el programa ABAQUS, donde para el análisis de resultados se tomaron los elementos más críticos del mallado del cilindro.

Las particiones con mayor esfuerzo (MPa) son:

- Elemento 116 a tracción
- Elemento 284 a compresión (se analizó este elemento)

La partición con mayor deformación (mm):

- Elemento 101

Tabla 21. Resultados exportados de abaqus- Cilindro con 0.2% de fique

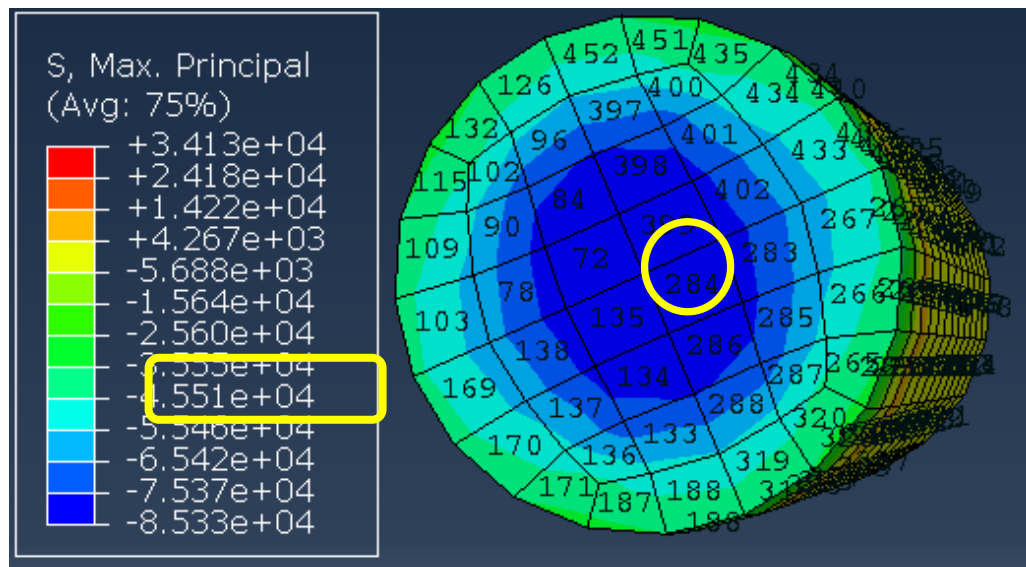
CONCRETO 28 (MPa) 0.2% DE FIBRA DE FIQUE						
ODB: C:/temp/Job- 1.odb Step: Step-1 Frame: Increment 1: Step Time = 0.1000						
Element Label	Int	DEFORMACIÓN		ESFUERZO		
		E.Max. Prin	E.Min. Prin	S.Mises	S.Max. Prin	S.Min. Prin
101	1	0.47	- 2.18	53,597.40	201.63	- 54,598.30
284	1	0.12	- 1.82	40,089.30	- 8,539.54	- 48,675.50
Minimum						
At Element		284	101	284	284	265
Int Pt		1	1	1	1	1
Maximum						
At Element		101	284	101	116	116
Int Pt		1	1.00E+00	1.00E+00	1	1
Total		212.90	- 1,085.57	26,797,500.0	- 223,783	- 27,134,800

Fuente. Propia

### 5.3.1 Esfuerzo a la compresión máxima principal

Se muestra la imagen del modelo donde se señala la partición 284 con el mayor esfuerzo a la compresión en cara del empotramiento. La partición esta sombreada de color azul con lo que se puede revisar la magnitud del esfuerzo entre  $(-7.537e+04$  y  $-8.533e+04)$ , lo cual coincide con el valor arrojado por el programa de s. Max: 85,395 (MPa).

**Figura 15. Modelo cilindro con 0.2% adición de fibra-esfuerzo máximo a la compresión**



Fuente. Propia

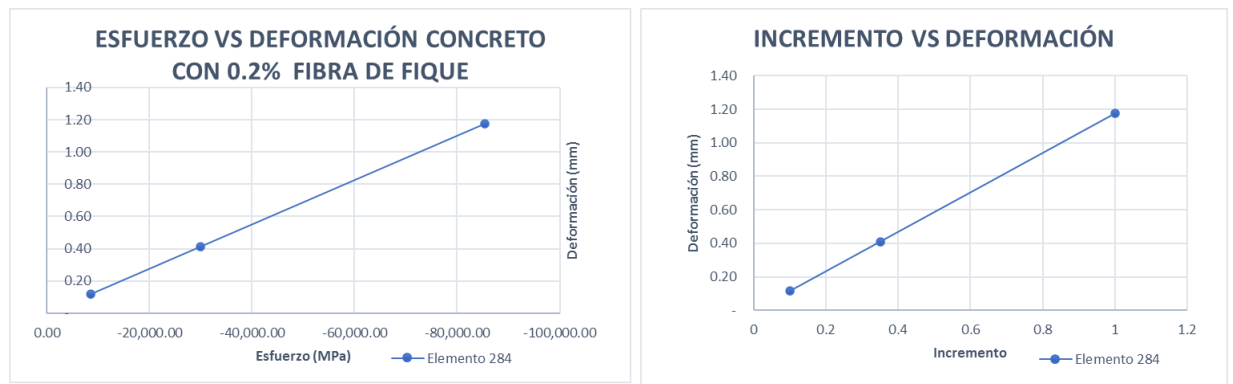
**Tabla 22. Elemento con mayor esfuerzo en el cilindro con adición de 0.2% de fibra**

ELEMENTO CON MAYOR ESFUERZO				
PORCENTAJE DE FIBRA	ELEMENTO	INCREMENTO	ESFUERZO (MPa)	DEFORMACIÓN (mm)
0.2%	284	0.1	- 8,539.54	0.12
		0.35	- 29,888.40	0.41
		1	- 85,395.40	1.17

Fuente. Propia

Las gráficas de los resultados son en forma lineal, ya que en el presente trabajo solo se trabajó el rango elástico.

**Figura 16. Gráficas elemento con mayor esfuerzo cilindro con adición de 0.2% fibra**

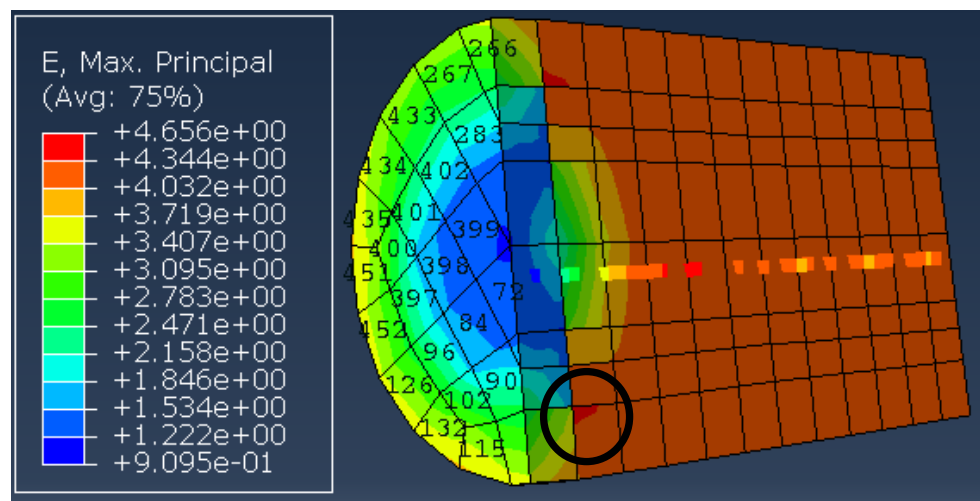


Fuente. Propia

### 5.3.2 Deformación máxima principal

Se muestra la imagen del modelo donde se señala la partición 101 con la mayor deformación. La partición esta sombreada de color rojo con lo que se puede revisar la magnitud de la deformación entre (4.344 y 4.656), lo cual coincide con el valor arrojado por el programa de E. Max: 4.655 (mm).

**Figura 17. Modelo cilindro con adición de 0.2% fibra-deformación máxima**



Fuente. Propia

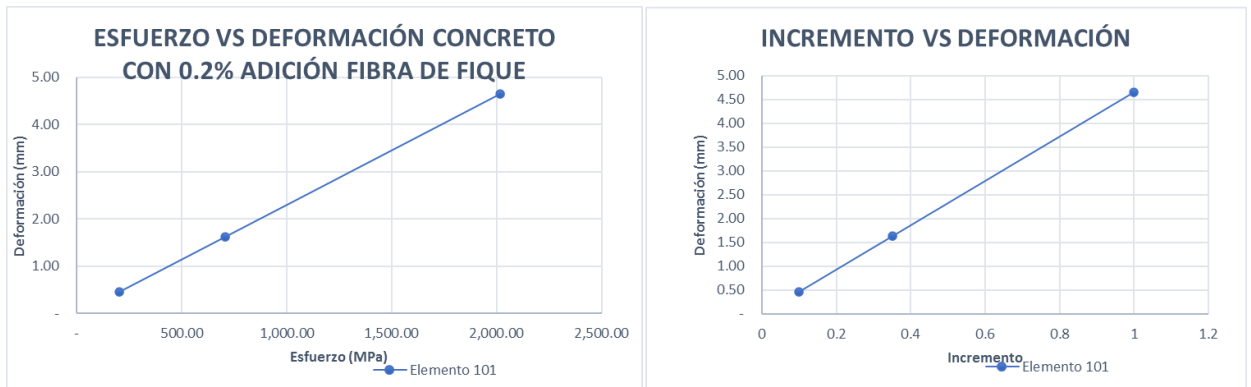


**Tabla 23.Elemento con mayor deformación en el cilindro con adición de 0.2% fibra**

ELEMENTO CON MAYOR DEFORMACIÓN				
PORCENTAJE DE FIBRA	ELEMENTO	INCREMENTO	ESFUERZO (MPa)	DEFORMACIÓN (mm)
0.2%	101	0.1	201.63	0.47
		0.35	705.70	1.63
		1	2,016.27	4.656

Fuente. Propia

**Figura 18.Gráficas elemento con mayor deformación cilindro con adición de 0.2% fibra**



Fuente. Propia

## 5.4 CILINDRO CON ADICIÓN DE FIBRA DE 0.3%

Tabla 24. Número de fibras con el 0.3% de fique

Número de fibras de fique	
$\#fibras = \frac{\text{Área total}}{\text{Área de una fibra}}$	205

Fuente. Propia

A Continuación, se muestran los resultados generados por el programa ABAQUS, donde para el análisis de resultados se tomaron los elementos más críticos del mallado del cilindro.

Las particiones con mayor esfuerzo (MPa) son:

- Elemento 116 a tracción
- Elemento 284 a compresión (se analizó este elemento)

La partición con mayor deformación (mm):

- Elemento 101

Tabla 25. Resultados exportados de abaqus- Cilindro con 0.3% de fique

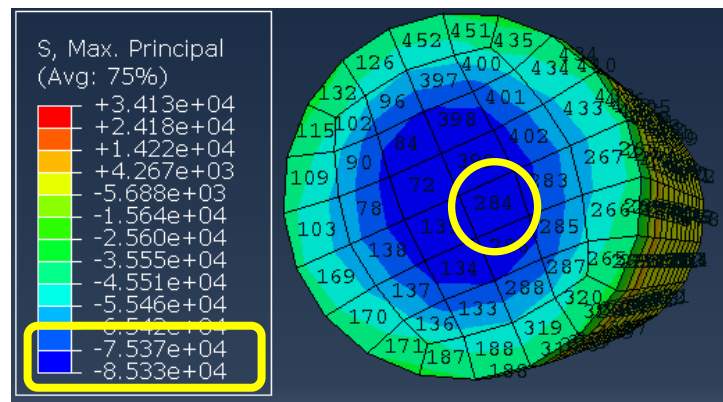
CONCRETO 28 (MPa) 0.3% DE FIBRA DE FIQUE							
ODB: C:/temp/Job- 1.odb Step: Step-1 Frame: Increment 1: Step Time = 0.1000							
Element Label	Int	DEFORMACIÓN		ESFUERZO			
		E.Max. Prin	E.Min. Prin	S.Mises	S.Max. Prin	S.Min. Prin	
101	1	0.47	- 2.18	53,596.80	201.22	- 54,598.20	
284	1	0.12	- 1.82	40,090.00	- 8,538.48	- 48,676.30	
Minimum		0.12	- 2.18	40,090.00	- 8,538.48	- 55,528.00	
At Element		284	101	284	284	265	
Int Pt		1	1	1	1	1	
Maximum		0.47	- 1.82	53,596.80	1,353.50	- 48,515.20	
At Element		101	284	101	116	116	
Int Pt		1	1	1	1	1	
Total		212.88	- 1,085.56	26,796,800.00	- 224,379.00	- 27,134,700	

Fuente. Propia

#### 5.4.1 Esfuerzo a la compresión máxima principal

Se muestra la imagen del modelo donde se señala la partición 284 con el mayor esfuerzo a la compresión en cara del empotramiento. La partición esta sombreada de color azul con lo que se puede revisar la magnitud del esfuerzo entre  $(-7.537e+04$  y  $-8.533e+04)$ , lo cual coincide con el valor arrojado por el programa de s. Max: 85,384 (MPa).

**Figura 19. Modelo cilindro con 0.3% adición de fibra-esfuerzo máximo a la compresión**



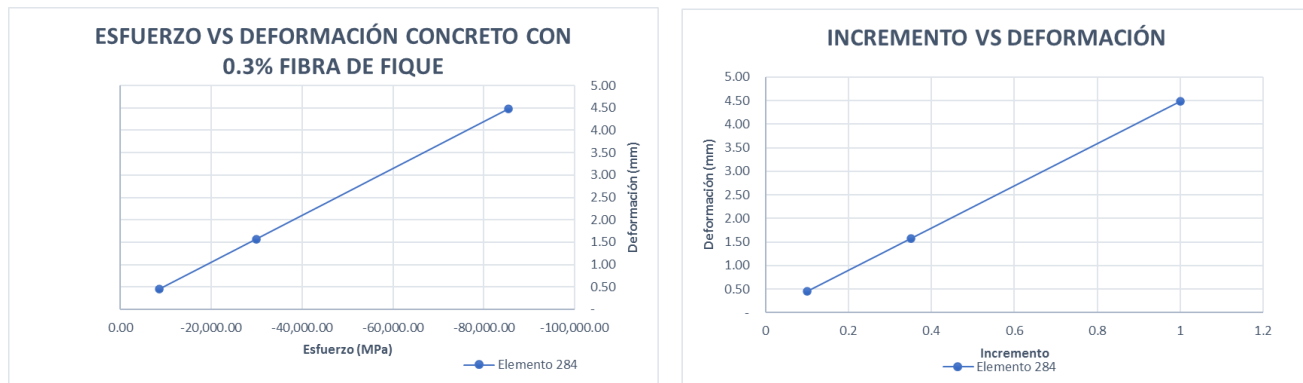
Fuente. Propia

**Tabla 26. Elemento con mayor esfuerzo en el cilindro con adición de 0.3% de fibra**

ELEMENTO CON MAYOR ESFUERZO Y DEFORMACIÓN				
PORCENTAJE DE FIBRA	ELEMENTO	INCREMENTO	ESFUERZO (MPa)	DEFORMACIÓN (mm)
0.3%	284	0.1	8,538.48	0.45
		0.35	29,884.70	1.57
		1	85,384.80	4.48

Fuente. Propia

Las gráficas de los resultados son en forma lineal, ya que en el presente trabajo solo se trabajó el rango elástico.

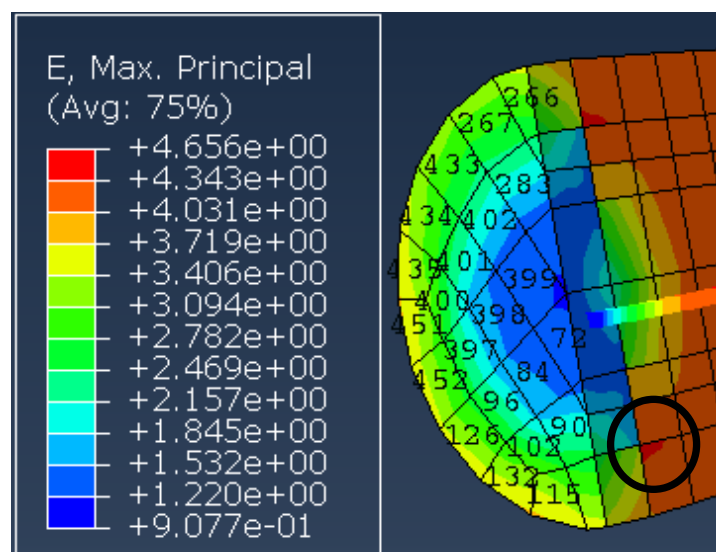


Fuente. Propia

#### 5.4.2 Deformación máxima principal

Se muestra la imagen del modelo donde se señala la partición 101 con la mayor deformación. La partición esta sombreada de color rojo con lo que se puede revisar la magnitud de la deformación entre (4.344 y 4.656), lo cual coincide con el valor arrojado por el programa de E. Max: 4,655 (mm).

Figura 20. Modelo cilindro con adición de 0.3% fibra-deformación máxima



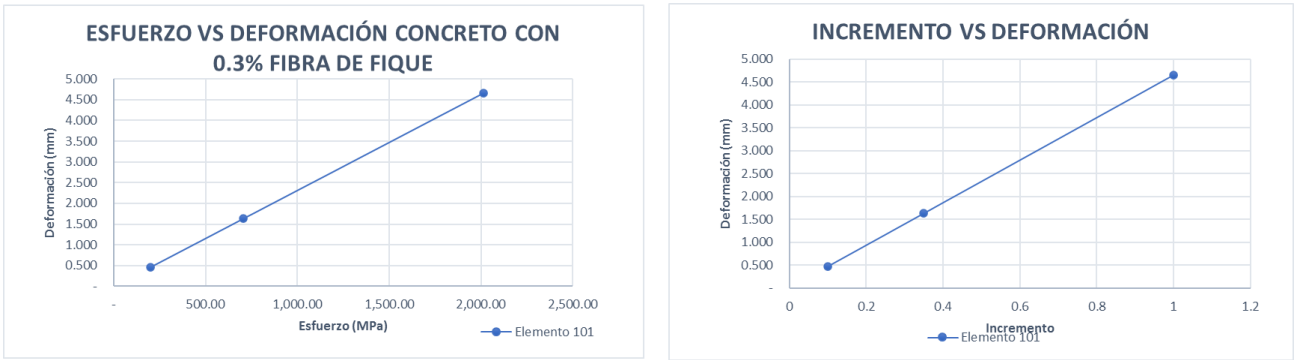
Fuente. Propia

**Tabla 27.Elemento con mayor deformación en el cilindro con adición de 0.3% fibra**

ELEMENTO CON MAYOR ESFUERZO Y DEFORMACIÓN				
PORCENTAJE DE FIBRA	ELEMENTO	INCREMENTO	ESFUERZO (MPa)	DEFORMACIÓN (mm)
0.3%	101	0.1	201.22	0.466
		0.35	704.26	1.630
		1	2,012.16	4.656

Fuente. Propia

**Figura 21.Gráficas elemento con mayor deformación cilindro con adición de 0.3% fibra**



Fuente. Propia

## 6 ANÁLISIS RESULTADOS DE ESFUERZOS EN CILINDROS

Tabla 28. Resumen esfuerzos y deformaciones en los cilindros elemento 284

COMPARATIVO DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN ENTRE PORCENTAJES				
% DE FIBRA	ELEMENTO	INCREMENTO	ESFUERZO (MPa)	DEFORMACIÓN (mm)
0%	284	0.1	- 8,533.76	0.45
		0.35	- 29,868.20	1.57
		1	- 85,337.60	4.48

0.1%	284	0.1	- 8,537.30	0.12
		0.35	- 29,880.50	0.41
		1	- 85,373.00	1.18

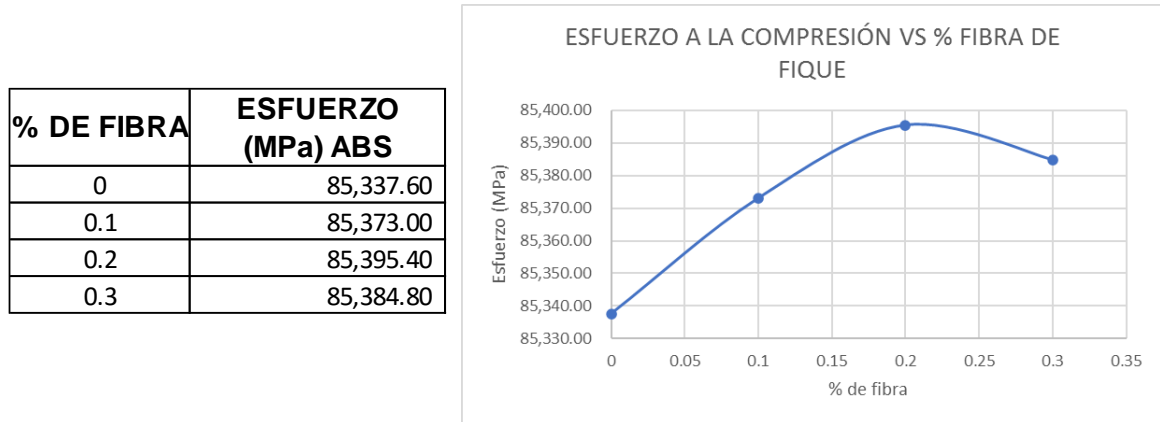
0.2%	284	0.1	- 8,539.54	0.12
		0.35	- 29,888.40	0.41
		1	- 85,395.40	1.17

0.3%	284	0.1	- 8,538.48	0.45
		0.35	- 29,884.70	1.57
		1	- 85,384.80	4.48

Mayor esfuerzo y deformación - incremento 1	- 85,395.40	1.17
Mayor esfuerzo y deformación - incremento 1	- 85,337.60	4.48

Fuente. Propia

**Figura 22.Comparativo esfuerzos Vs % de fibra - Cilindro**



Fuente. Propia

- Para el análisis y conclusiones se tomaron los resultados de las particiones críticas del mallado del elemento modelado (vigas y cilindros), ya que en estas particiones se evidenciaron los mayores esfuerzos y deformaciones que alcanzo el modelo.
- El mayor esfuerzo a la compresión para el elemento cilíndrico se obtuvo en la partición 284 con una magnitud de  $-8,539 \times 10^4$  MPa cuando la matriz de concreto tiene una adición de fibra de fique del 0,2%, y el menor esfuerzo a la compresión fue de una magnitud de  $8,533 \times 10^4$  MPa con 0% de adición de fibra.
- Se puede observar que el valor ideal de porcentaje de fibra en la cual el cilindro a compresión mejora sus valores de esfuerzo, se encuentra entre 0.2% y 0.3%, ya que cuando la cantidad de fique supera el 0.3%, se presenta una tendencia a disminuir las capacidades a compresión del concreto.
- Se puede observar que con porcentajes de fique entre 0.2% y 0.3% con respecto al peso del agregado fino, las capacidades del concreto a compresión mejoran en un 0.07%, lo que se traduce en una pequeña mejora del comportamiento mecánico del concreto en elemento a compresión. En términos económicos, las fibras de fique poseen un bajo costo comercial, lo que la convierte en una fibra accesible económicamente.

## 7 ANÁLISIS RESULTADOS DEFORMACIONES EN CILINDROS

Tabla 29. Resumen esfuerzos y deformaciones en los cilindros elemento 101

COMPARATIVO DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN ENTRE PORCENTAJES				
% DE FIBRA	ELEMENTO	INCREMENTO	ESFUERZO (MPa)	DEFORMACIÓN (mm)
0%	101	0.1	201.16	0.47
		0.35	704.05	1.63
		1	2,011.56	4.66

0.1%	101	0.1	202.21	0.33
		0.35	707.75	1.55
		1	2,022.13	4.66

0.2%	101	0.1	201.63	0.47
		0.35	705.70	1.63
		1	2,016.27	4.66

0.3%	101	0.1	201.22	0.47
		0.35	704.26	1.63
		1	2,012.16	4.66

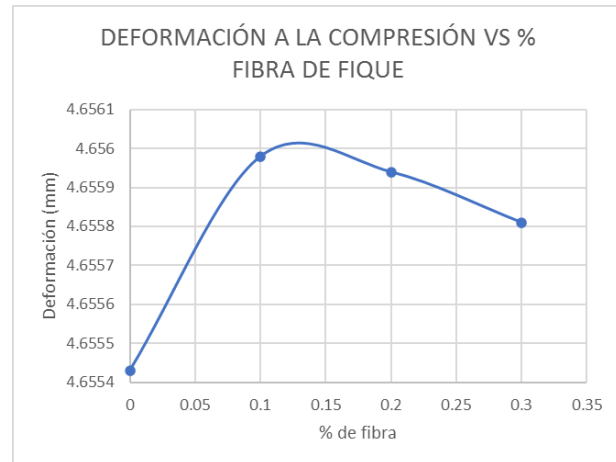
Mayor esfuerzo y deformación - incremento 1	2,022.13	4.66
Menor esfuerzo y deformación - incremento 1	2,011.56	4.66

Fuente. Propia



**Figura 23.Comparativo Deformaciones Vs % de fibra - Cilindro**

<b>% DE FIBRA</b>	<b>DEFORMACIÓN (mm)</b>
0	4.65543
0.1	4.65598
0.2	4.65594
0.3	4.65581



Fuente. Propia

- La partición que obtuvo la mayor deformación fue la numero 101 del mallado en el elemento cilíndrico la cual alcanzo una deformación de 4,65598 mm cuando la matriz de concreto tiene una adición de fibra de fique del 0.1%, y la menor deformación fue de una magnitud de 4,65543mm con 0% de adición de fibra de fique.
- El concreto con adición de 0.2% y 0.3% de fibra obtuvieron deformaciones más cercanas al mayor valor.

## 8 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO TIPO VIGA

Para elaborar la viga a modelar en el programa ABAQUS, se tomaron datos de la tesis de la Universidad Piloto de Colombia-Seccional Magdalena [15].

**Tabla 30. Dimeniones de la viga**

DIMENSIONES DE LA VIGA	
Longitud (m)	0,53
Ancho (m)	0,15
Lado (m)	0,15
Área (m2)	0,023
Área (mm2)	22500,0
Volumen (m3)	0,0119

Fuente. Propia

Posterior a esto se procedió a calcular la cantidad de fibra de fique necesaria, para el volumen del elemento tipo viga.

MASA DE FIQUE PARA LA VIGA		
$\frac{3.3 \text{ Kg}}{X} = \frac{1 \text{ m}^3}{0.0119 \text{ m}^3}$	0.0394	Kg

Fuente. Propia

Se cálculo el área perpendicular que debería ocupar la cantidad de fibra en el cilindro, para luego dividirla por el área de una fibra y de esta manera determinar la cantidad de fibras por unidad que se modelarían.

1. Se utilizó la ecuación de densidad, donde se despejó el volumen ya que tenían los datos de masa y densidad.
2. Se calculó el volumen.
3. Se calculó el lado de la sección cuadrada de la viga.
4. Se calculó el área general del contenido de fique.

**Tabla 31. Área transversal fibras de fique a utilizar**

Masa del fique (Kg)	$\frac{3.3 \text{ Kg}}{X} = \frac{1 \text{ m}^3}{0.0119 \text{ m}^3}$		<b>0.0394</b>
Densidad (kg/mm3)	$\rho = \frac{m}{v}$		<b>1.45.E-06</b>
Volumen (mm3)	$v = \frac{m}{\rho}$	$V = \frac{0.0119 \text{ Kg}}{1.45 \text{ e}^{-6} \text{ Kg/mm}^3}$	<b>27139.66</b>
Lado (mm)	$r = \sqrt{\frac{v}{\pi * h}}$	$r = \sqrt{\frac{23275,86 \text{ mm}^3}{\pi * 60 \text{ mm}}}$	<b>12.00</b>
Área (mm2)	$A = \pi * r^2$	$A = \pi * (12 \text{ mm})^2$	<b>452.33</b>
Número de fibras	$\#fibras = \frac{\text{Área total}}{\text{Área de una fibra}}$		<b>461</b>

Fuente. Propia

Para determinar el número de fibras a modelar se dividió el área general del contenido de fique  $903.10 \text{ mm}^2$  entre el área de la fibra de fique  $0.0491 \text{ mm}^2 * 20$ , con el objetivo de aumentar el grosor de la fibra y tener un número considerable a modelar para el programa.

**Tabla 32. Número de fibras para la viga**

Número de fibras de fique	
$\#fibras = \frac{\text{Área total}}{\text{Área de una fibra}}$	<b>461</b>

Fuente. Propia

## 8.1 CÁLCULO DE LA FUERZA A APLICAR EN EL MODELO

Para determinar la fuerza se despejo de la ecuación de esfuerzo, se tomó el dato de resistencia máxima a la flexión del ensayo experimental de la tesis desarrollada por la Universidad Piloto de Colombia-Seccional Magdalena [15] y se dividió entre el área del cilindro.

**Tabla 33. Fuerza a aplicar en la viga**

Magnitud de la fuerza aplicar		
Resistencia máxima a compresión	(PSI)	MPa
	42	31
Esfuerzo máx. = $\frac{\text{Fuerza}}{\text{Área}}$	Fuerza = <i>Esfuerzo máx. * Área de la viga</i>	
Fuerza aplicar en el modelo	697500.00	N

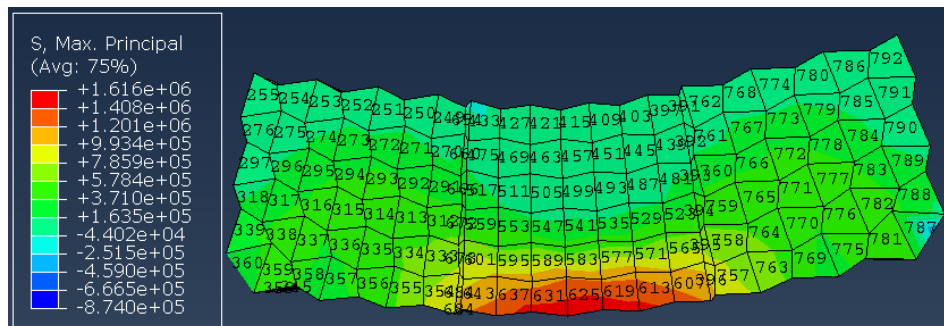
Fuente. Propia

## 8.2 MODELACIÓN DE LA VIGA

Se muestra la imagen general que arroja el programa ABAQUS, donde se observa que los elementos de mayor esfuerzo y deformación se encuentran debajo del eje neutro, sobre la cara inferior.

El área de mayor esfuerzo esta sombreada de color rojo.

**Figura 24. Modelo obtenido para la viga en ABAQUS**



Fuente. Propia

## 9 RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA VIGA

### 9.1 VIGA SIN ADICIÓN DE FIBRA

A Continuación, se muestran los resultados generados por el programa ABAQUS, donde para el análisis de resultados se tomaron los elementos más críticos del mallado de la viga, los cuales se encuentran ubicados en el centro de la cara opuesta a la aplicación de la fuerza.

Las particiones con mayor esfuerzo (MPa) y deformación (mm) son:

- Elemento 627 a la flexión (Mayor valor para las proporciones de 0.2% y 0.3%)
- Elemento 628 a la flexión (Mayor valor para las proporciones de 0% y 0.1%)

Con base a los resultados anteriormente mencionados y teniendo en cuenta que los elementos críticos se encuentran ubicados en la misma región, se puede decir que la ubicación de la fibra influye en los esfuerzos de las particiones.

**Tabla 34. Resultados exportados de abaqus-Viga de control**

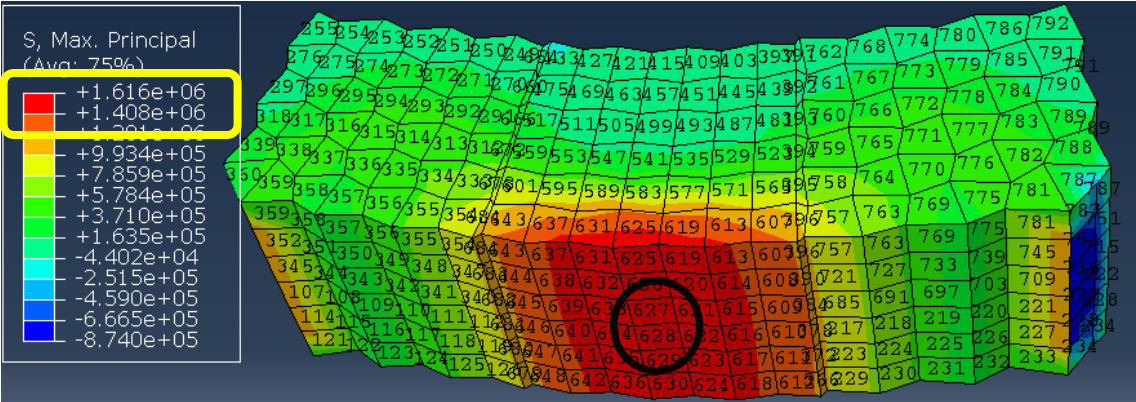
CONCRETO 28 (MPa) 0% DE FIBRA DE FIQUE						
ODB: C:/temp/Job- 1.odb Step: Step-1 Frame: Increment 1: Step Time = 0.1000						
Element Label	Int	DEFORMACIÓN		ESFUERZO		
		E.Max. Prin	E.Min. Prin	S.Mises	S.Max. Prin	S.Min. Prin
627	1	6.56	- 1.36	162,375.00	163,808.00	- 350.18
628	1	6.56	- 1.36	162,386.00	163,816.00	- 351.36
Minimum		0.0717	- 17.64	5,738	- 87,397.80	- 474,192.00
At Element		792	353	132	346	353
Int Pt		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Maximum		6.563	- 0.10	394,040.00	163,816.00	10,862.50
At Element		628	219	120	628	219
Int Pt		1	1	1	1	1
Total		1,670	- 2,860	85,998,600	26,754,200	- 67,132,500

Fuente. Propia

9.1.1 Esfuerzo a la flexión máxima principal

Se muestra la imagen del modelo donde se señala las particiones 627 y 628 con el mayor esfuerzo a la flexión en cara inferior de la viga. La partición esta sombreada de color rojo donde se puede revisar la magnitud del esfuerzo entre (1.616e+06 y 1.408e+06), lo cual coincide con el valor arrojado por el programa de s. más: 1.63e+06 (MPa).

Figura 25. Modelo viga sin adición de fibra-esfuerzo máximo



Fuente. Propia

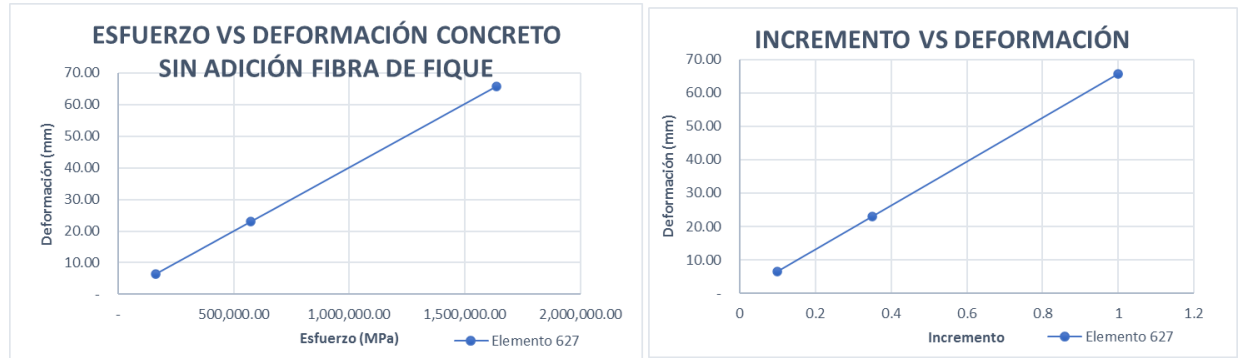
Tabla 35. Elemento con mayor esfuerzo en la viga sin adición de fibra

ELEMENTO CON MAYOR ESFUERZO Y DEFORMACIÓN				
PORCENTAJE DE FIBRA	ELEMENTO	INCREMENTO	ESFUERZO (MPa)	DEFORMACIÓN (mm)
0%	627	0.1	163,808.00	6.56
		0.35	573,327.00	22.97
		1	1,638,080.00	65.63

Fuente. Propia

Las gráficas de los resultados son en forma lineal, ya que en el presente trabajo solo se trabajó el rango elástico.

**Figura 26. Gráficas elemento con mayor esfuerzo viga sin adición de fibra**

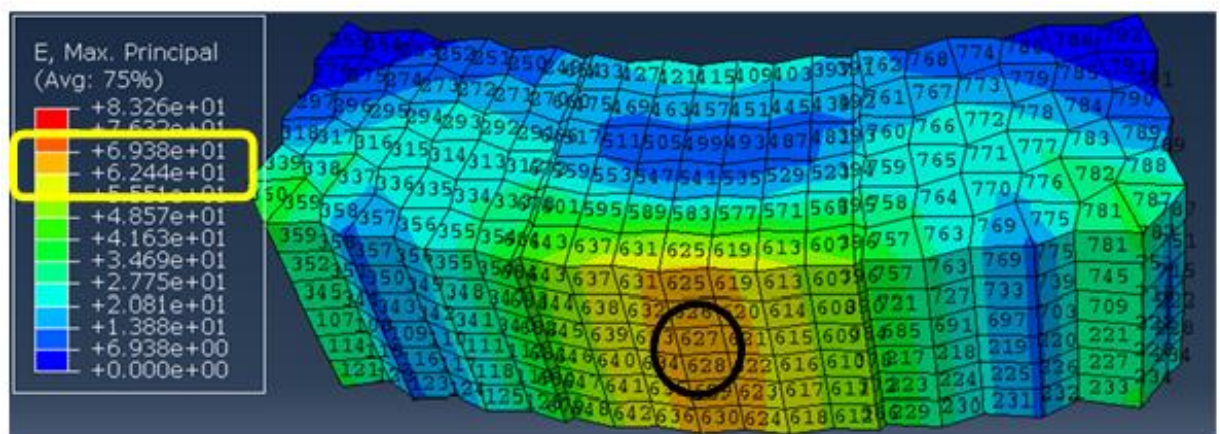


Fuente. Propia

### 9.1.2 Deformación máxima principal

Se muestra la imagen del modelo donde se señalan las particiones 627 y 628 con las mayores deformaciones. Las particiones están sombreadas de color naranja con lo que se puede revisar la magnitud de la deformación entre (63 y 69 mm), lo cual coincide con el valor arrojado por el programa de E. Max 65 (mm)

**Figura 27. Modelo viga sin adición de fibra-deformación máxima**



Fuente. Propia

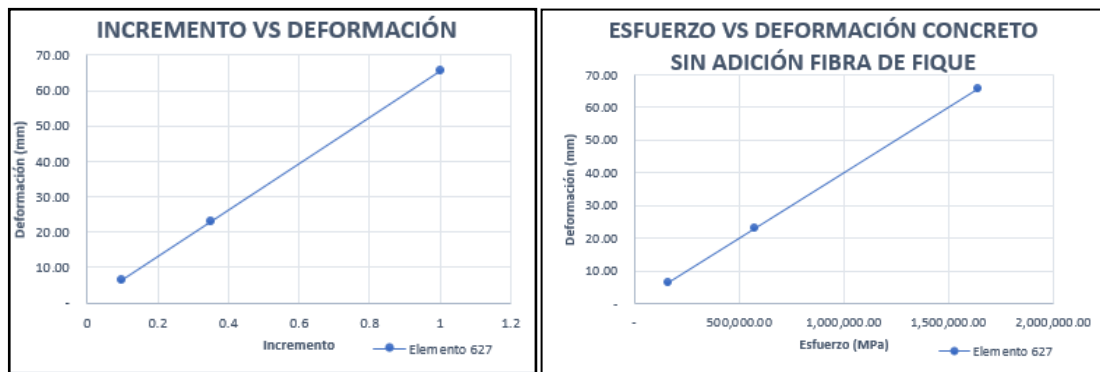
**Tabla 36. Elementos con mayor esfuerzo y deformación en la viga sin adición de fibra**

ELEMENTO CON MAYOR ESFUERZO Y DEFORMACIÓN				
PORCENTAJE DE FIBRA	ELEMENTO	INCREMENTO	ESFUERZO (MPa)	DEFORMACIÓN (mm)
0%	627	0.1	163,808.00	6.56
		0.35	573,327.00	22.97
		1	1,638,080.00	65.63
0%	628	0.1	163,816.00	6.56
		0.35	573,356.00	22.97
		1	1,638,160.00	65.63

Fuente. Propia

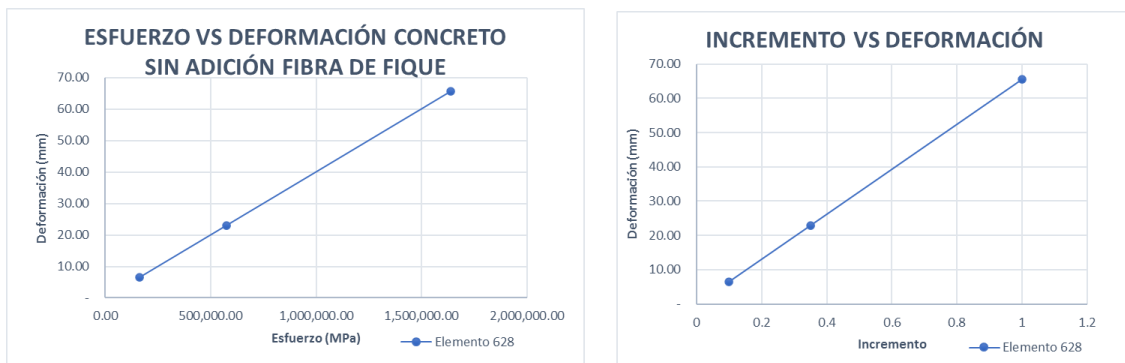
Las gráficas de los resultados son lineales, ya que en el presente trabajo solo se trabajó el rango elástico.

**Figura 28. Gráficas elemento 627 viga sin adición de fibra**



Fuente. Propia

**Figura 29. Gráficas elemento 628 viga sin adición de fibra**



Fuente. Propia



## 9.2 VIGA CON ADICIÓN DE FIBRA DE FIQUE DE 0.1%

**Tabla 37. Número de fibras con el 0.1% de fique**

Número de fibras de fique	
$\#fibras = \frac{\text{Área total}}{\text{Área de una fibra}}$	140

Fuente. Propia

A Continuación, se muestran los resultados generados por el programa ABAQUS, donde para el análisis de resultados se tomaron los elementos más críticos del mallado de la viga, los cuales se encuentran ubicados en el centro de la cara opuesta a la aplicación de la fuerza.

Las particiones con mayor esfuerzo (MPa) y deformación (mm) son:

- Elemento 627 a la flexión (Mayor valor para las proporciones de 0.2% y 0.3%)
- Elemento 628 a la flexión (Mayor valor para las proporciones de 0% y 0.1%)

**Tabla 38. Resultados exportados de abaqus-Viga con 0.1% de fique**

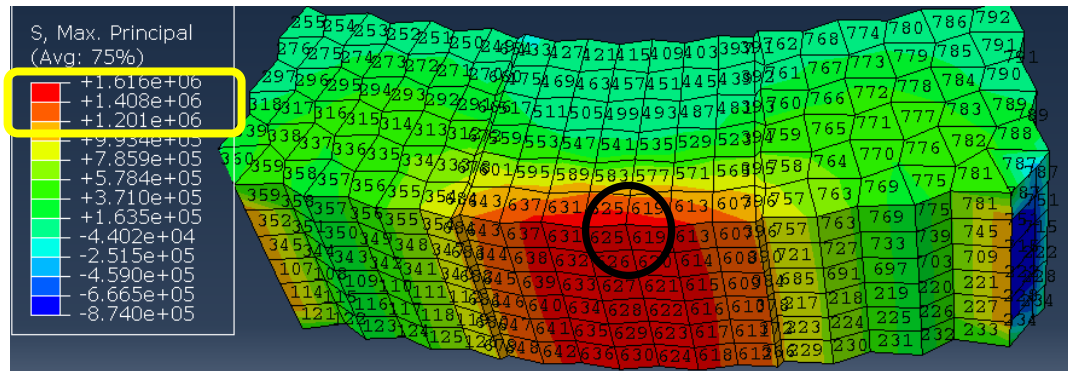
CONCRETO 28 (MPa) 0.1% DE FIBRA DE FIQUE						
ODB: C:/temp/Job- 1.odb Step: Step-1 Frame: Increment 1: Step Time = 0.1000						
Element Label	Int	DEFORMACIÓN		ESFUERZO		
		E.Max. Prin	E.Min. Prin	S.Mises	S.Max. Prin	S.Min. Prin
627	1	6.56	1.36	162,375.00	163,808.00	350.18
628	1	6.56	1.36	162,386.00	163,816.00	351.36
Minimum		0.07	17.64	5,738.48	87,397.80	474,192.00
At Element		792	353	132	346	353
Int Pt		1	1	1	1	1
Maximum		6.56	0.10	394,040.00	163,816.00	10,862.50
At Element		628	219	120	628	219
Int Pt		1	1	1	1	1
Total		1,670	2,860	85,998,600	26,754,200	67,132,500

Fuente. Propia

### 9.2.1 Esfuerzo a la flexión máxima principal

Se muestra la imagen del modelo donde se señala las particiones 627 y 628 con el mayor esfuerzo a la flexión en cara inferior de la viga. La partición esta sombreada de color rojo donde se puede revisar la magnitud del esfuerzo entre ( $1.616\text{e}+06$  y  $1.408\text{e}+06$ ), lo cual coincide con el valor arrojado por el programa de s. Max:  $1.63\text{e}+06$  (MPa).

**Figura 30. Modelo viga con 0.1% adición de fibra-esfuerzo máximo a la flexión**

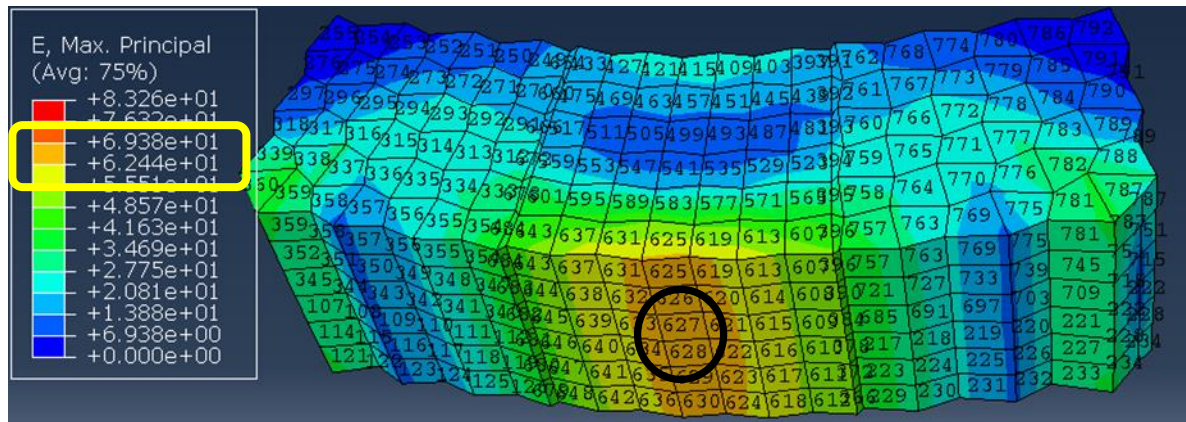


Fuente. Propia

### 9.2.2 Deformación máxima principal

Se muestra la imagen del modelo donde se señalan las particiones 627 y 628 con la mayor deformación. Las particiones esta sombreada de color naranja con lo que se puede revisar la magnitud de la deformación entre (63 mm y 69 mm), lo cual coincide con el valor arrojado por el programa de E. Max: 65 (mm).

**Figura 31. Modelo viga con adición de 0.1% fibra-deformación máxima**



Fuente. Propia

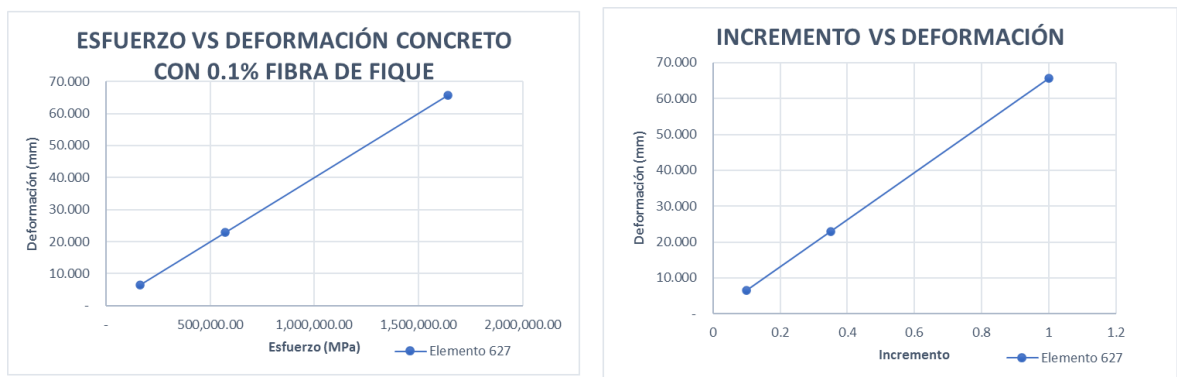
**Tabla 39. Elementos con mayor esfuerzo y deformación en la viga con adición de 0.1% fibra**

ELEMENTO CON MAYOR ESFUERZO Y DEFORMACIÓN				
PORCENTAJE DE FIBRA	ELEMENTO	INCREMENTO	ESFUERZO (MPa)	DEFORMACIÓN (mm)
0.1%	627	0.1	163,808.00	6.563
		0.35	573,327.00	22.971
		1	1,638,080.00	65.630
0.1%	628	0.1	163,816.00	6.56
		0.35	573,356.00	22.97
		1	1,638,160.00	65.63

Fuente. Propia

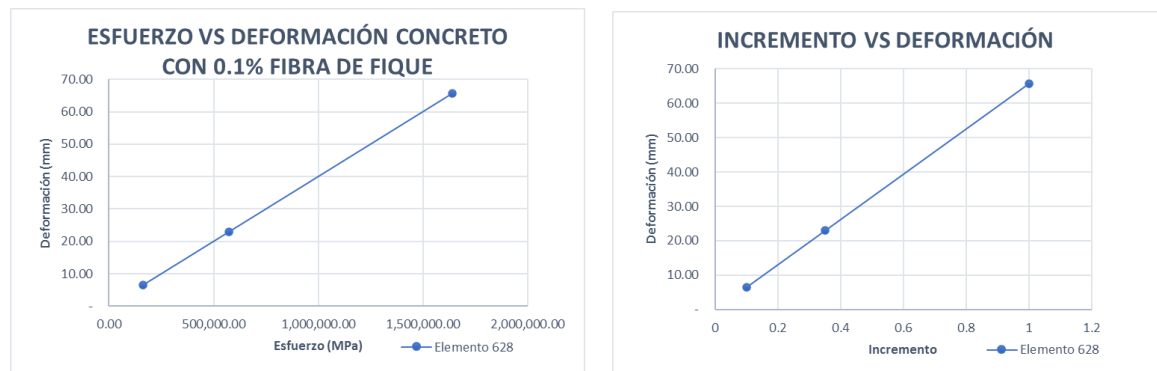
Las gráficas de los resultados son lineales, ya que en el presente trabajo solo se trabajó el rango elástico.

**Figura 32. Gráficas elemento 627 viga con adición de 0.1% fibra**



Fuente. Propia

**Figura 33. Gráficas elemento 628 viga con adición de 0.1% fibra**



Fuente. Propia

### 9.3 VIGA CON ADICIÓN DE FIBRA DE FIQUE DE 0.2%

Figura 34. Número de fibras con el 0.2% de fique

Número de fibras de fique	
$\#fibras = \frac{\text{Área total}}{\text{Área de una fibra}}$	279

Fuente. Propia

A Continuación, se muestran los resultados generados por el programa ABAQUS, donde para el análisis de resultados se tomaron los elementos más críticos del mallado de la viga, los cuales se encuentran ubicados en el centro de la cara opuesta a la aplicación de la fuerza.

Las particiones con mayor esfuerzo (MPa) y deformación (mm) son:

- Elemento 627 a la flexión (Mayor valor para las proporciones de 0.2% y 0.3%)
- Elemento 628 a la flexión (Mayor valor para las proporciones de 0% y 0.1%)

Tabla 40. Resultados exportados de abaqus-Viga con 0.2% de fique

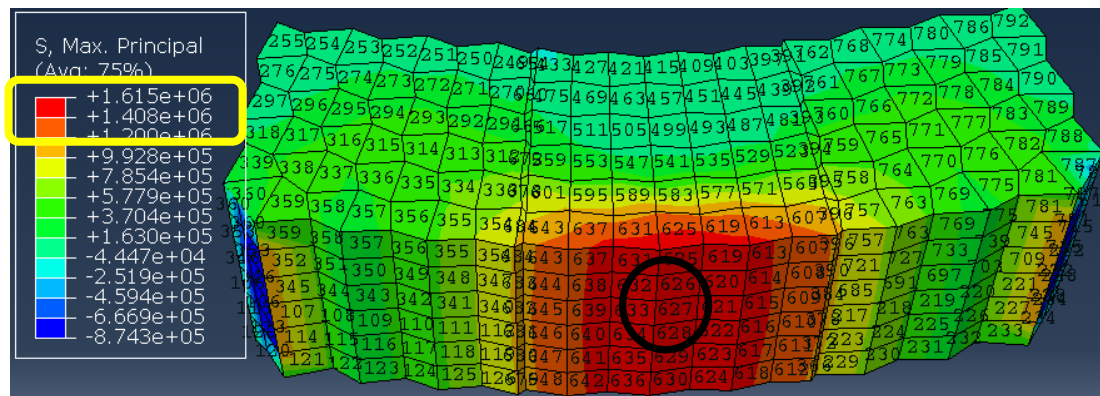
CONCRETO 28 (MPa) 0.2% DE FIBRA DE FIQUE						
ODB: C:/temp/Job- 1.odb Step: Step-1 Frame: Increment 1: Step Time = 0.1000						
Element Label	Int	DEFORMACIÓN		ESFUERZO		
		E.Max. Prin	E.Min. Prin	S.Mises	S.Max. Prin	S.Min. Prin
627	1	6.56	1.36	162,324.00	163,747.00	363.33
628	1	6.56	1.36	162,311.00	163,744.00	345.92
Minimum		0.07	17.65	5,719.32	87,431.00	474,400.00
At Element		792	113	132	106	113
Int Pt		1	1	1	1	1
Maximum		6.56	0.10	394,091.00	163,747.00	10,870.40
At Element		627	219	120	627	219
Int Pt		1	1	1	1	1
Total		1,669	2,860	85,979,700	26,738,000	67,128,600

Fuente. Propia

### 9.3.1 Esfuerzo a la flexión máxima principal

Se muestra la imagen del modelo donde se señala las particiones 627 y 628 con el mayor esfuerzo a la flexión en cara inferior de la viga. La partición esta sombreada de color rojo donde se puede revisar la magnitud del esfuerzo entre ( $1.616\text{e}+06$  y  $1.408\text{e}+06$ ), lo cual coincide con el valor arrojado por el programa de s. Max:  $1.63\text{e}+06$  (MPa).

**Figura 35. Modelo viga con 0.2% adición de fibra-esfuerzo máximo a la flexión**

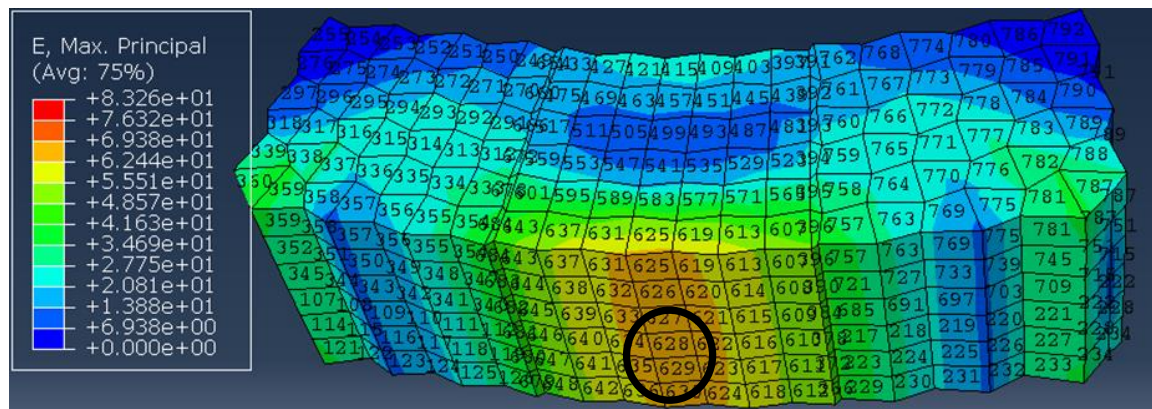


Fuente. Propia

### 9.3.2 Deformación máxima principal

Se muestra la imagen del modelo donde se señalan las particiones 627 y 628 con la mayor deformación. Las particiones esta sombreada de color naranja con lo que se puede revisar la magnitud de la deformación entre (63 mm y 69 mm), lo cual coincide con el valor arrojado por el programa de E. Max: 65 (mm).

**Figura 36. Modelo viga con adición de 0.2% fibra-deformación máxima a la flexión**



Fuente. Propia

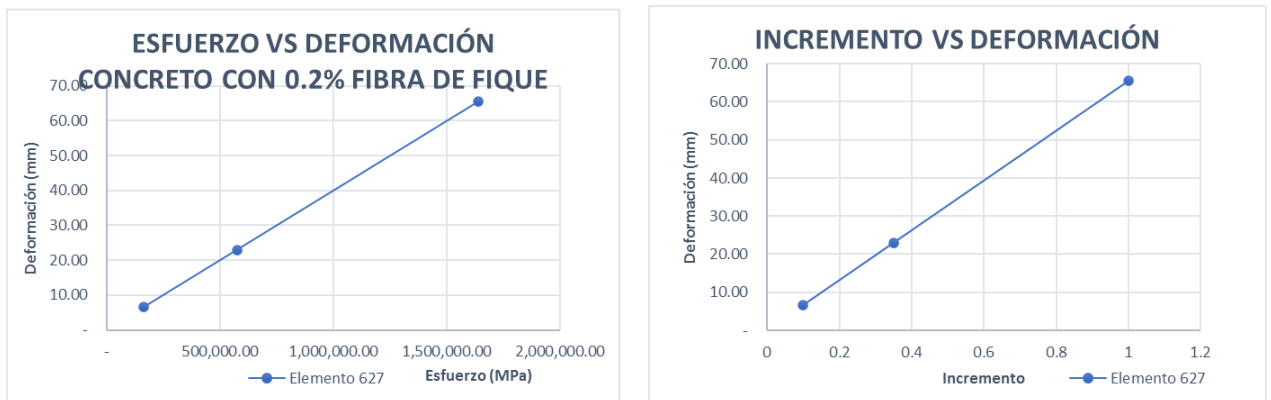
**Tabla 41.Elementos con mayor esfuerzo y deformación en la viga con adición de 0.2% fibra**

ELEMENTO CON MAYOR ESFUERZO Y DEFORMACIÓN				
PORCENTAJE DE FIBRA	ELEMENTO	INCREMENTO	ESFUERZO (MPa)	DEFORMACIÓN (mm)
0.2%	627	0.1	163,747.00	6.56
		0.35	573,113.00	22.97
		1	1,637,470.00	65.61
0.2%	628	0.1	163,744.00	6.56
		0.35	573,103.00	22.96
		1	1,637,440.00	65.60

Fuente. Propia

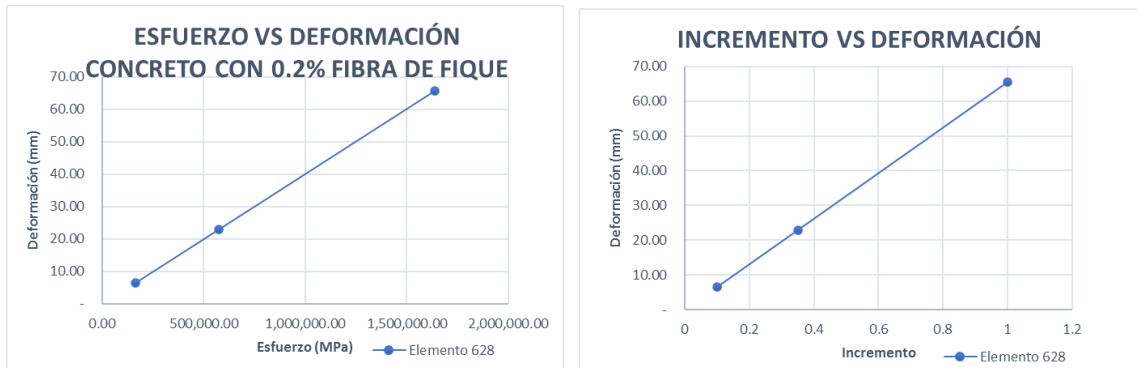
Las gráficas de los resultados son lineales, ya que en el presente trabajo solo se trabajó el rango elástico.

**Figura 37.Gráficas elemento 627 viga con adición de 0.2% fibra**



Fuente. Propia

**Figura 38.Gráficas elemento 628 viga con adición de 0.2% fibra**



Fuente. Propia



## 9.4 VIGA CON ADICIÓN DE FIBRA DE FIQUE DE 0.3%

**Tabla 42. Número de fibras con el 0.3% de fique**

Número de fibras de fique	
$\#fibras = \frac{\text{Área total}}{\text{Área de una fibra}}$	461

Fuente. Propia

A Continuación, se muestran los resultados generados por el programa ABAQUS, donde para el análisis de resultados se tomaron los elementos más críticos del mallado de la viga, los cuales se encuentran ubicados en el centro de la cara opuesta a la aplicación de la fuerza.

Las particiones con mayor esfuerzo (MPa) y deformación (mm) son:

- Elemento 627 a la flexión (Mayor valor para las proporciones de 0.2% y 0.3%)
- Elemento 628 a la flexión (Mayor valor para las proporciones de 0% y 0.1%)

**Tabla 43. Resultados exportados de abaqus-Viga con 0.3% de fique**

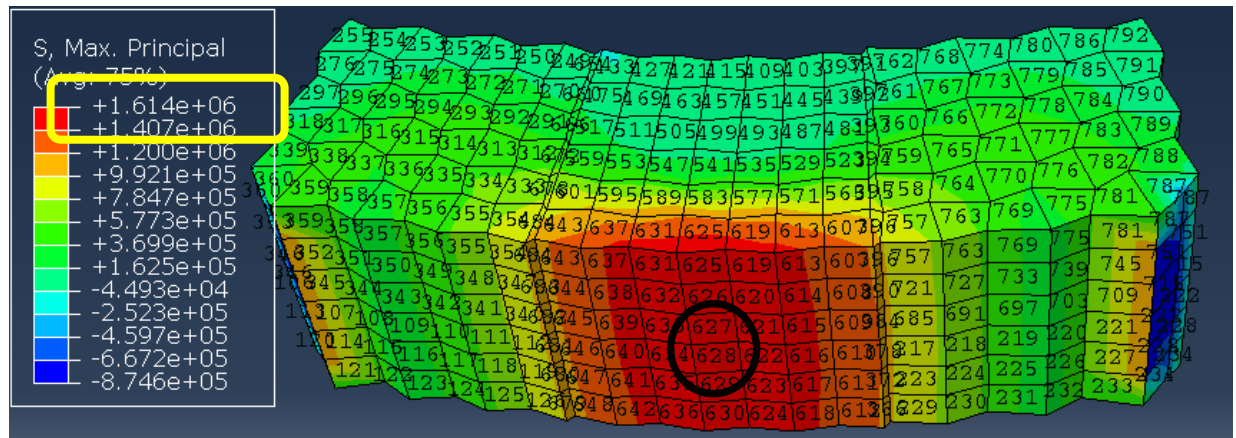
CONCRETO 28 (MPa) 0.3% DE FIBRA DE FIQUE						
ODB: C:/temp/Job- 1.odb Step: Step-1 Frame: Increment 1: Step Time = 0.1000						
Element Label	Int	DEFORMACIÓN		ESFUERZO		
		E.Max. Prin	E.Min. Prin	S.Mises	S.Max. Prin	S.Min. Prin
627	1	6.56	1.36	162,229.00	163,650.00	366.05
628	1	6.56	1.36	162,209.00	163,645.00	337.60
Minimum						
		0.07	17.66	5,703.61	87,455.90	474,544.00
At Element		792	113	132	106	113
Int Pt		1	1	1	1	1
Maximum						
		6.56	0.10	394,166.00	163,650.00	10,877.30
At Element		627	219	120	627	219
Int Pt		1	1	1	1	1
Total						
		1,668.73	2,859.49	85,961,600	26,725,300.00	67,122,500

Fuente. Propia

#### 9.4.1 Esfuerzo a la flexión máxima principal

Se muestra la imagen del modelo donde se señala las particiones 627 y 628 con el mayor esfuerzo a la flexión en cara inferior de la viga. La partición esta sombreada de color rojo donde se puede revisar la magnitud del esfuerzo entre ( $1.616 \times 10^6$  y  $1.408 \times 10^6$ ), lo cual coincide con el valor arrojado por el programa de s. Max:  $1.63 \times 10^6$  (MPa).

**Figura 39. Modelo viga con 0.3% adición de fibra-esfuerzo máximo a la flexión**

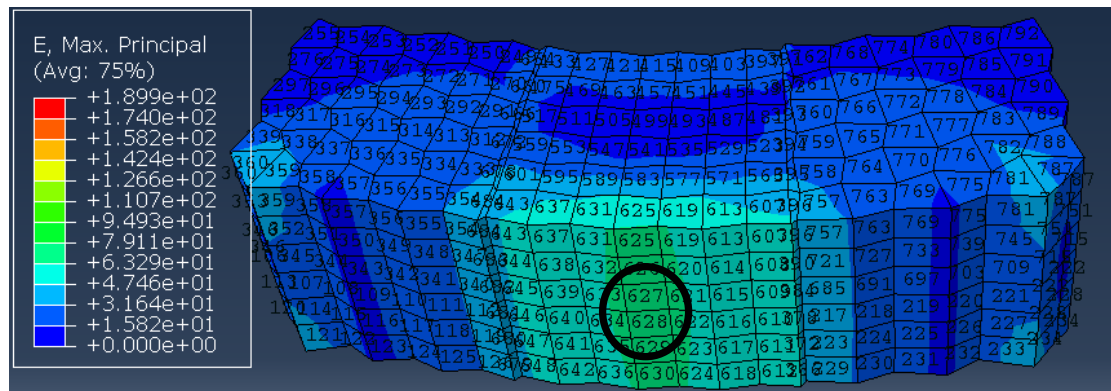


Fuente. Propia

#### 9.4.2 Deformación máxima principal

Se muestra la imagen del modelo donde se señalan las particiones 627 y 628 con la mayor deformación. Las particiones esta sombreada de color naranja con lo que se puede revisar la magnitud de la deformación entre (63 mm y 69 mm), lo cual coincide con el valor arrojado por el programa de E. Max: 65 (mm).

**Figura 40. Modelo viga con adición de 0.3% fibra-deformación máxima a la flexión**



Fuente. Propia



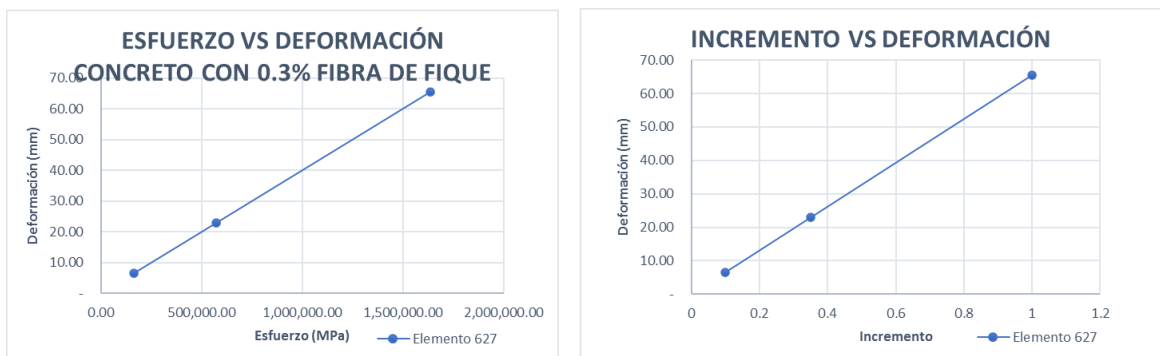
**Tabla 44. Elementos con mayor esfuerzo y deformación en la viga con adición de 0.3% fibra**

ELEMENTO CON MAYOR ESFUERZO Y DEFORMACIÓN				
PORCENTAJE DE FIBRA	ELEMENTO	INCREMENTO	ESFUERZO (MPa)	DEFORMACIÓN (mm)
0.3%	627	0.1	163,650.00	6.56
		0.35	572,773.00	22.95
		1	1,636,500.00	65.57
0.3%	628	0.1	163,645.00	6.56
		0.35	572,756.00	22.95
		1	1,636,450.00	65.56

Fuente. Propia

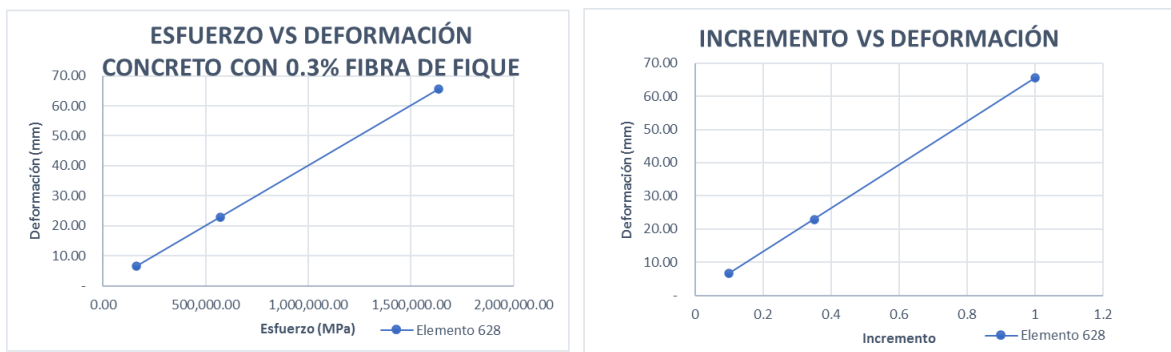
Las gráficas de los resultados son lineales, ya que en el presente trabajo solo se trabajó el rango elástico.

**Figura 41. Gráficas elemento 627 viga con adición de 0.3% fibra**



Fuente. Propia

**Figura 42. Gráficas elemento 628 viga con adición de 0.3% fibra**



Fuente. Propia

**Tabla 45. Resumen esfuerzos y deformaciones en las vigas elemento 627**

<b>COMPARATIVO DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN ENTRE PORCENTAJES</b>				
<b>% DE FIBRA</b>	<b>ELEMENTO</b>	<b>INCREMENTO</b>	<b>ESFUERZO A LA FLEXIÓN (MPa)</b>	<b>DEFORMACIÓN (mm)</b>
0.0%	627	0.1	163,808	6.56
		0.35	573,327	22.97
		1	1,638,080	65.63

0.1%	627	0.1	163,808	6.56
		0.35	573,327	22.97
		1	1,638,080	65.63

0.2%	627	0.1	163,747	6.56
		0.35	573,113	22.97
		1	1,637,470	65.61

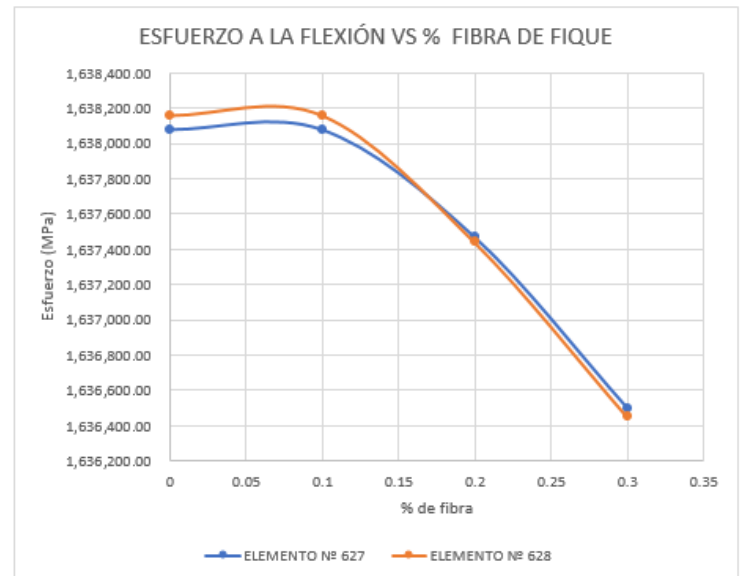
0.3%	627	0.1	163,650	6.56
		0.35	572,773	22.95
		1	1,636,500	65.57

<b>Menor esfuerzo y deformación - incremento 1</b>	1,636,500	65.57
<b>Mayor esfuerzo y deformación - incremento 1</b>	1,638,080	65.63

Fuente. Propia

**Figura 43. Comparativos esfuerzos Vs % de fibra - Viga**

% DE FIBRA	ESFUERZO A LA FLEXIÓN (MPa) (elemento 627)	ESFUERZO A LA FLEXIÓN (MPa) (elemento 628)
0	1,638,080.00	1,638,160.00
0.1	1,638,080.00	1,638,160.00
0.2	1,637,470.00	1,637,440.00
0.3	1,636,500.00	1,636,450.00



Fuente. Propia

- Para el análisis y conclusiones se tomaron los resultados de las particiones críticas del mallado del elemento modelado (vigas), ya que en estas particiones se evidenciaron los mayores esfuerzos y deformaciones que alcanza el modelo.
- En el elemento viga se presentaron dos particiones como elementos críticos, el N° 627 y 628, los cuales obtuvieron una mayor resistencia al esfuerzo a la flexión cuando la matriz de concreto no tenía adición de fibra.
- Con base a que se trabajó en el rango elástico del concreto, se puede observar en la gráfica que el comportamiento mecánico de los elementos viga fueron lineales, a lo que se puede hacer referencia a la ley de Hooke, ya que en los resultados obtenidos, con la mayor dosificación (0.3%) de la fibra en la matriz de concreto, se reducía el esfuerzo y la deformación y a menor cantidad (0%) de fibra se obtuvieron los mayores esfuerzos y la deformaciones.

**Tabla 46. Resumen esfuerzos y deformaciones en las vigas elemento 628**

COMPARATIVO DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN ENTRE PORCENTAJES				
% DE FIBRA	ELEMENTO	INCREMENTO	ESFUERZO A LA FLEXIÓN (MPa)	DEFORMACIÓN N (mm)
0%	628	0.1	163,816	6.56
		0.35	573,356	22.97
		1	1,638,160	65.63

0.1%	628	0.1	163,816	6.56
		0.35	573,356	22.97
		1	1,638,160	65.63

0.2%	628	0.1	163,744	6.56
		0.35	573,103	22.96
		1	1,637,440	65.60

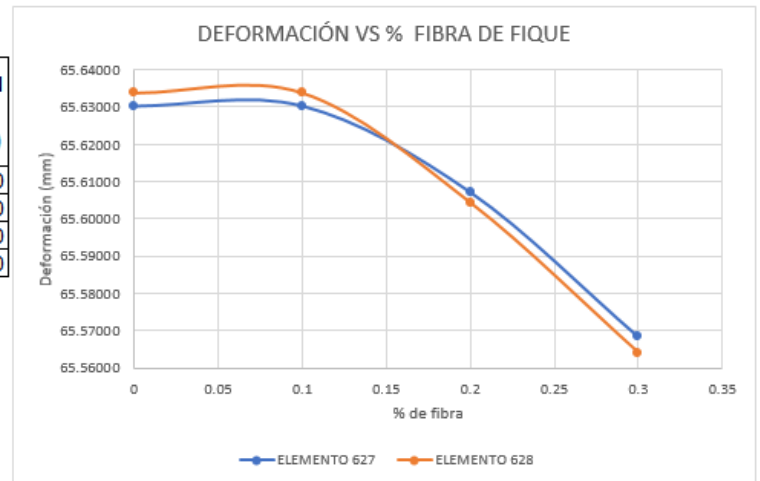
0.3%	628	0.1	163,645	6.56
		0.35	572,756	22.95
		1	1,636,450	65.56

Menor esfuerzo y deformación - incremento 1	1,636,450	65.56
Mayor esfuerzo y deformación - incremento 1	1,638,160	65.63

Fuente. Propia

**Figura 44.Comparativo deformación Vs % de fibra - Viga**

% DE FIBRA	DEFORMACIÓN (mm) (elemento 627)	DEFORMACIÓN (mm) (elemento 628)
0	65.63010	65.63380
0.1	65.63010	65.63380
0.2	65.60700	65.60430
0.3	65.56830	65.56400



Fuente. Propia

- En cuanto a las deformaciones las particiones 627 y 628 obtuvieron una mejora con la adición de la fibra de fique, ya que se obtuvo una menor deformación en estos elementos con la dosificación el 0.3% de fibra.
- A lo mencionado anteriormente se puede observar en la gráfica que la matriz de concreto tiende a tener un comportamiento lineal, ya que con cada aumento de la cantidad de fibra se disminuyen las deformaciones.

## 10 CONCLUSIONES

### 10.1 CILINDRO

- Se puede concluir que la adición de fibra de fique le aporó a la matriz de concreto mayor resistencia a la compresión, ya que con el 0.2% de fibra se obtuvo el valor de  $-8,539 \times 10^4$  MPa y sin adición de fibra  $-8,533 \times 10^4$  MPa, aunque el aumento de la resistencia del esfuerzo no fue de gran diferencia.
- Se puede concluir que la adición de la fibra al concreto no le aporó resistencia a la deformación, ya que el elemento alcanzó mayor resistencia a la deformación con el valor de 4.65543 mm cuando la matriz no tenía adición de fibra, a lo anteriormente dicho debemos tener en cuenta que el cilindro fue probado con una aplicación de la fuerza a compresión, ya que la fibra por ser un elemento tipo cable no trabaja su mejor cualidad que es la tensión.
- Como se mencionó en el documento desarrollado por la Universidad Piloto de Colombia-Seccional Magdalena [15], los porcentajes ideales de adición de fibra de fique se presentan por debajo del 0.3%, donde se pudo evidenciar que para el rango elástico el valor óptimo se encuentra entre el 0.2% y el 0.3%, siendo este el rango óptimo de adición de fibra en el cual se mejoran las capacidades de compresión del concreto.
- En cuanto al valor comercial de la fibra, se encuentra en el mercado local a \$7.000 pesos por kilo de fibra de fique, lo cual es un valor bajo teniendo en cuenta que mejora la capacidad a compresión del concreto y disminuye el peso del elemento.

## 10.2 VIGA

- Se puede concluir que la fibra de fique le aporta mejoras al concreto en el comportamiento mecánico a la flexión, ya que con el aumento de la dosificación de fibra se observó una disminución en el esfuerzo desde 1.638,080 MPa hasta 1.636,50 MPa.
- Con base en el comportamiento observado de las vigas y en especial en las particiones críticas con cada uno de los porcentajes de fibras adicionadas, se puede concluir que la fibra le ayuda a la matriz de concreto a disminuir las deformaciones, ya que se observó una disminución la deformación del elemento desde 65.633 mm sin adición de fibra hasta 65.664 mm con el 0.3% de fibra.
- Se concluyó que el modelo digital trabajo con condiciones ideales debido a que no se tuvieron en cuenta factores externos como la humedad, temperatura, entre otros; los cuales pudieron condicionar los resultados obtenidos. Adicional a esto en la elaboración de un concreto es muy difícil que se realice una distribución homogénea de las fibras como la que se realizó para el modelo.

## 11 RECOMENDACIONES

- Se recomienda para trabajos futuros tener en cuenta las propiedades plásticas de los materiales, ya que en el presente trabajo solo se utilizaron las propiedades elásticas, lo cual no permite tener un análisis más completo del comportamiento mecánico de los elementos.
- Se recomienda para próximos trabajos o ensayos tener en cuenta el deterioro de la fibra natural debido a la alta alcalinidad del concreto, ya que en el presente trabajo no fue posible tener en cuenta afectación sufrida por la fibra, la cual podría influir en el tiempo de servicio del concreto.
- Como conclusión para posibles trabajos futuros, se pueden analizar el comportamiento mecánico del concreto, con porcentajes de fibra de fique entre 0.3% y 0.2%, obteniendo de esta manera un valor más cercano al óptimo para esta matriz de concreto-fique, ya que en este rango de porcentajes se obtuvo los mayores incrementos de esfuerzo.



## 12 BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Zheng, C. Lou, G. Du, X. Li, Z. Liu, and L. Li, "Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate," *Results Phys.*, vol. 9, no. April, pp. 1317–1322, 2018, doi: 10.1016/j.rinp.2018.04.061.
- [2] S. Liliana, Q. García, L. Octavio, and G. Salcedo, "Las Propiedades Mecánicas Del Concreto," p. 3461, 2006.
- [3] C. Julián, G. Giovanni, and A. William, "Correlaciones entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero," *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 14, no. 3, pp. 435–450, 2013, doi: 10.1016/s1405-7743(13)72256-x.
- [4] A. sofia Irias Pineda, "Refuerzos De Elmentos Estructurales Con Hormigones Con Fibras O Solo Fibras," *Univ. Politécnica Madrid Esc. Técnica Super. Ing. Caminos, Canales Y Puertos*, 2013, [Online]. Available: [http://oa.upm.es/19998/1/Tesis\\_master\\_Ana\\_Sofia\\_Irias\\_Pineda.pdf](http://oa.upm.es/19998/1/Tesis_master_Ana_Sofia_Irias_Pineda.pdf).
- [5] I. Díaz and I. Fromm, "The Rebirth of Natural Fibers ? Analysis of Market Potential for Fique ( *Furcraea andina* ) Production in Santander , Colombia," vol. 9, no. 2, p. 1981, 2017, doi: 10.15406/jnhfe.2019.09.00326.
- [6] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, C. C. de I. A. Corpoica, and I. I. de cooperación para la agricultura IICA, "Acuerdo Para El Fomento De La Producción Y La Competitividad Del Subsector Del Fique," p. 45, 2004, [Online]. Available: [http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/4084/1/2007222155234\\_ACUERDOCOMPETITIVIDADFIQUE2004.pdf](http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/4084/1/2007222155234_ACUERDOCOMPETITIVIDADFIQUE2004.pdf).
- [7] NSR-10, "NSR-10 Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente," *Nsr-10*, vol. Título A, p. 186, 2010.
- [8] P. Luna, J. Lizarazo-Marriaga, L. Luna, J. Ortiz, and D. Mayorga, "Mechanical behavior of natural fiber textile reinforced mortar sheets," *Sustain. Constr. Mater. Technol.*, vol. 2, no. 1, 2019.
- [9] A. Cristea, "DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN CONCRETO ADICIONADO CON FIBRA DE FIQUE A PARTIR DE SU RESISTENCIA A LA TRACCIÓN, FLEXIÓN Y COMPRESIÓN," 2016.
- [10] M. Muñoz Velez, M. Hidalgo Salazar, and J. Mina Hernandez, "Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. influencia de la modificación superficial," *Biotechnol. en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial BSAA*, vol. 12, no. 2, pp. 60–70, 2014.

- [11] E. Vidaud, I. Vidaud, and Z. Frómeta, “Una aproximación a los concretos reforzados con fibras,” pp. 30–35, 2015.
- [12] C. G. Barbosa and J. S. Mayorga, “CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE FIQUE MODIFICANDO LA MATRIZ CEMENTICIA CON ADITIVO A BASE DE HUMO DE SÍLICE,” 2015.
- [13] S. Quintero García and L. González Salcedo, “Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto,” *Rev. Científica Ing. y Desarro.*, vol. 20, no. 20, pp. 134-150–150, 2011.
- [14] C. Juárez Alvarado, P. Rodríguez López, R. Rivera Villareal, and M. Rechy De Von Roth, “Uso de las fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en el concreto,” *Ingenierías*, vol. 7, no. 22, pp. 7–19, 2012.
- [15] S. P. Galvis, “Análisis de la resistencia a compresión y flexión del concreto modificado con fibra de fique,” *Ingenierías*, vol. XVI, no. 61, pp. 27–37, 2013.
- [16] Simulia, “Abaqus / CAE 6.14 User’s Manual,” *Dassault Systèmes Inc. Provid. RI, USA*, pp. 1–1146, 2014.
- [17] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), “ASTM C1157,” *Stand. Perform. Specif. Hydraul. Cem.*, 2003.
- [18] D. Sánchez De Guzmán, “TECNOLOGIA DEL CONCRETO Y DEL MORTERO,” 1996.
- [19] ICONTEC, “NORMA TECNICA NTC COLOMBIANA 3459,” 2001. [Online]. Available: [https://www.academia.edu/30427756/NTC\\_3459\\_Agua\\_elaboración\\_concreto\\_](https://www.academia.edu/30427756/NTC_3459_Agua_elaboración_concreto_)
- [20] ICONTEC, “NORMA TECNICA NTC COLOMBIANA 220,” 2007. [Online]. Available: <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC2681.pdf>.
- [21] I. N. de V. INVIAS, “ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO I.N.V.E - 123 - 07,” *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 137, no. 254 mm, pp. 1–2, 2006, doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000373.
- [22] J. Huang *et al.*, “Research on the Dynamic Mechanical Properties and Constitutive Models of Steel Fiber Reinforced Concrete and Polypropylene Fiber Reinforced Concrete,” *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/9174692.
- [23] H. Hardjasaputra, G. Ng, G. Urgessa, G. Lesmana, and S. Sidharta, “Performance of Lightweight Natural-Fiber Reinforced Concrete,” *MATEC Web Conf.*, vol. 138, pp. 1–7, 2017, doi: 10.1051/mateconf/201713801009.
- [24] B. Chaichannawatik, A. Sirisonthi, Q. Hussain, and P. Joyklad, “Mechanical Properties of Fiber Reinforced Concrete,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 875, pp.

174–178, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.875.174.

- [25] J. F. Castillo-Lara *et al.*, “Mechanical properties of natural fiber reinforced foamed concrete,” *Materials (Basel)*., vol. 13, no. 14, 2020, doi: 10.3390/ma13143060.
- [26] M. Numérico, P. El, A. Del, R. Con, and F. Naturales, “Modelo Numérico para el Análisis del Comportamiento de Materiales Cementicios Reforzados con Fibras Naturales,” *Mecánica Comput.*, vol. 35, no. 34, pp. 1977–1988, 2017.
- [27] J. G. P. Salinas *et al.*, “Caracterización De Fibras Vegetales Utilizadas Como Refuerzo En Matrices Termoplásticos,” *J. Clean. Prod.*, vol. 18, no. 4, pp. 573–580, 2017, [Online]. Available: [http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=116744595&lang=es&site=eds-live%0Ahttp://www.upv.es/VALORES/Publicaciones/CNM08\\_Fibras\\_naturales.pdf](http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=116744595&lang=es&site=eds-live%0Ahttp://www.upv.es/VALORES/Publicaciones/CNM08_Fibras_naturales.pdf).